SUPER INTERESSANTE

EDIÇÃO BIBLIOTECA

O ABC DA COSMOLOGIA
DO BIG BANG AOS MULTIVERSOS

AS CHAVES PARA COMPREENDER O UNIVERSO, O QUE O MOVE, COMO CRESCE E POR QUE CONTINUA A DESAFIAR A CIÊNCIA

ISTOCK

Há séculos que olhamos o céu, a perguntar-nos quem somos, de onde viemos e até onde chega tudo isto. A cosmologia não é senão essa pergunta tornada ciência.

«A TEORIA QUÂNTICA FAZ-ME LEMBRAR UM POUCO OS DELÍRIOS DE UM PARANOICO EXTREMAMENTE INTELIGENTE»

Albert Einstein (1879–1955)
Físico teórico, laureado com o Prémio Nobel da Física de 1921

O universo espera por nós

Desde que o ser humano ergueu a cabeça pela primeira vez em direção ao céu noturno, soube que lá em cima havia algo maior do que ele. Não sabia o quê, mas não conseguia desviar o olhar. Esse fascínio ancestral é o ponto de partida da cosmologia: a ciência que ousa perguntar o que é tudo isto, de onde vem e para onde vai.

Não é astronomia, embora muitas vezes as confundamos. O astrónomo observa; o cosmólogo pensa. Precisa de um lápis, papel e das perguntas certas. Depois, se tiver sorte, os dados dão-lhe razão. Ou tiram-na. E aí está a grandeza: poucas disciplinas tiveram de reescrever-se tantas vezes em tão pouco tempo. Poucas obrigaram os seus próprios praticantes a deitar fora ideias que pareciam inabaláveis.

Em 1900, acreditávamos que a nossa galáxia era o universo inteiro. Que era estático e eterno. Que não tinha nascido nem morreria. Em pouco mais de um século, tudo isso ruiu. Hoje sabemos que o universo tem idade, história e, provavelmente, um destino. Sabemos que existem milhares de milhões de galáxias onde acreditávamos não haver nada. Sabemos que o espaço se expande, que o tempo pode curvar-se, que existem ondas gravitacionais que atravessam tudo. E ainda não sabemos o que é a maior parte daquilo que o compõe.

Para percorrer esse caminho contamos com Daniel Manrique, cuja assinatura sustenta todos os textos desta edição. É a história da nossa grande viagem, a da origem e evolução do universo, e Manrique conta-a maravilhosamente, com rigor e erudição, mas também com clareza e simplicidade.

O que existia antes do Big Bang? O universo é finito ou infinito? Porque existe algo em vez de nada? Erga a cabeça. O espetáculo vale a pena.

CRISTINA ENRÍQUEZ
DIRETORA

ISTOCK

CONTEÚDOS

INTRODUÇÃO 8

OS CINCO CONCEITOS
FUNDAMENTAIS DA COSMOLOGIA. 10

A COSMOLOGIA
DO BIG BANG 30

UM UNIVERSO À
RÉDEA SOLTA 42

UM BREVE APERITIVO:
COSMOLOGIAS QUÂNTICAS. 54

A MATÉRIA E A BALANÇA
DO SENHOR HIGGS 70

OS PLANOS OBSCUROS
DA CRIAÇÃO. 90

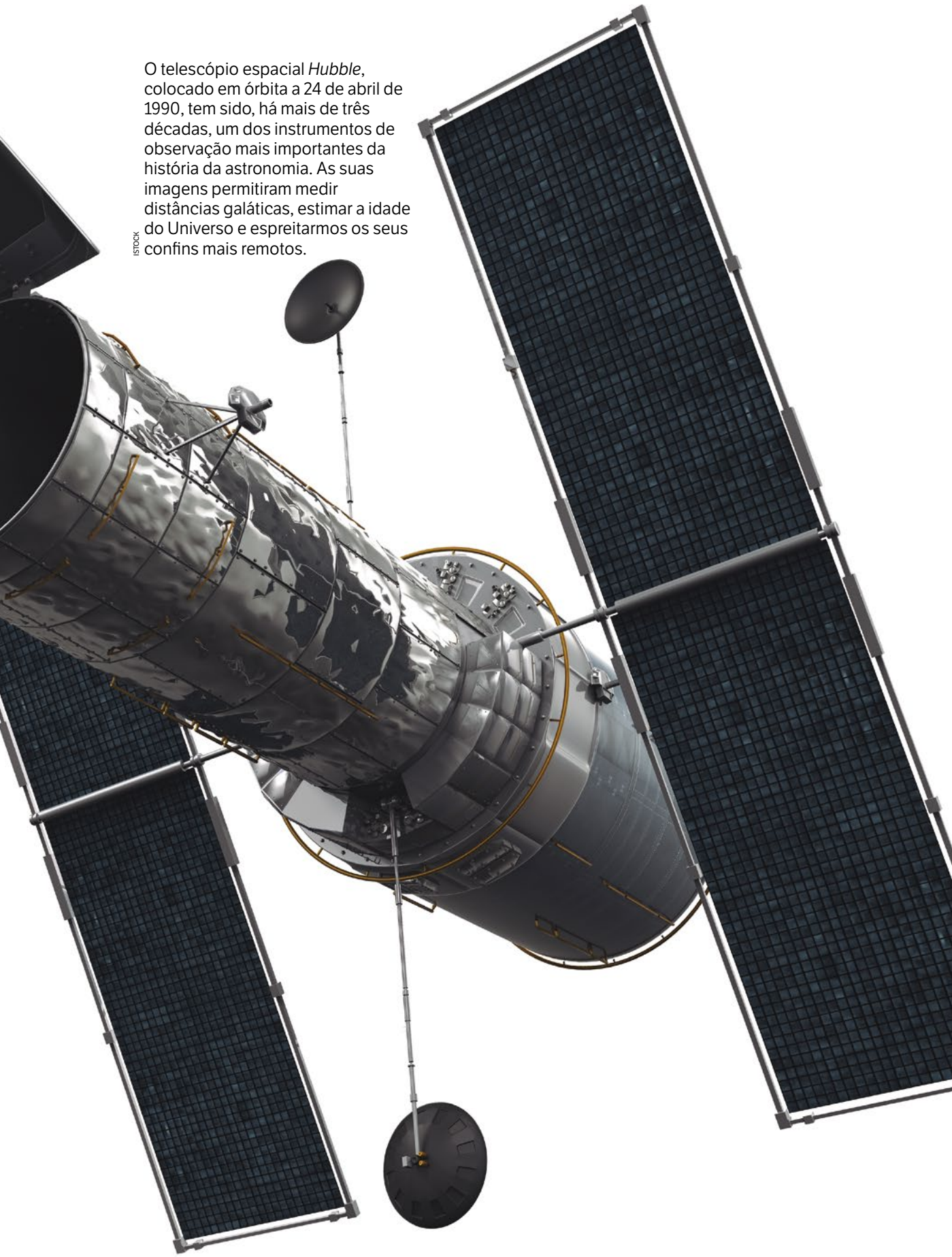
A CIDADE NO FIM
DA ETERNIDADE. 108

H, O PARÂMETRO
QUE DEFINE O INFINITO 120

UM MAPA PARA OS
VIAJANTES ESTELARES. 130

VIVEMOS NO UNIVERSO
DE *ASTEROIDS*? 140

BIBLIOGRAFIA 160



O telescópio espacial *Hubble*, colocado em órbita a 24 de abril de 1990, tem sido, há mais de três décadas, um dos instrumentos de observação mais importantes da história da astronomia. As suas imagens permitiram medir distâncias galáticas, estimar a idade do Universo e espreitarmos os seus confins mais remotos.

ISTOCK

Introdução

A cosmologia é a conquista mais importante do ser humano». Quando o cosmólogo espanhol Juan Carlos Bueno proferiu estas palavras, poucos imaginavam o seu alcance profundo. Para lá da sua ousadia, contém uma verdade fascinante: a cosmologia é a forma como o Universo procura refletir sobre si próprio. Somos pó de estrelas a tentar compreender as estrelas.

A cosmologia pode definir-se como a ciência que estuda a origem, a evolução e o destino do Universo, bem como as propriedades do espaço e do tempo. Mas esta definição apenas arranha a superfície de uma disciplina que conjuga física, matemática, filosofia e ousadia intelectual. É, talvez, a ciência mais ambiciosa desenvolvida pelo ser humano, porque o seu objeto de estudo não é um fenómeno particular, mas a totalidade do que existe.

Embora seja frequentemente confundida com a astronomia, a cosmologia opera noutro plano. O astrónomo observa o céu, recolhe dados com telescópios, analisa fotografias. A astronomia é, acima de tudo, empírica. O cosmólogo, pelo contrário, pensa o Universo nos seus aspetos mais profundos e abstratos. O seu trabalho pode, em teoria, fazer-se numa sala vazia, apenas com um lápis, papel e perguntas fundamentais sobre a natureza do espaço, do tempo e da matéria.

Há milénios que a Humanidade cria mitos para explicar a origem do cosmos. A cosmologia moderna partilha esse objetivo primordial, mas aborda-o com as ferramentas do método científico: a matemática, a observação rigorosa e a experimentação. Como disse Galileu Galilei, «a matemática é a linguagem do Universo». O que em tempos foram relatos orais são hoje modelos científicos passíveis de verificação.

Seria, porém, ingénuo pensar que a cosmologia é puramente objetiva. As perguntas que formulamos sobre o Universo estão fortemente condicionadas pelas nossas crenças, cultura e linguagem. Na Antiguidade, para alguns, perguntar-se pela origem do Universo não fazia sentido: o cosmos existira sempre. Hoje, há cientistas remunerados precisamente para se dedicarem a essa pergunta.

A relação entre ciência e religião merece uma reflexão cuidadosa. Documentários tentam explicar as pragas do Egito por fenómenos naturais, en-

quanto crentes sustentam que o Big Bang é o momento da criação divina. Mas tais exercícios partem de um pressuposto errado: que ciência e religião falam do mesmo.

O discurso religioso preserva a cultura, constrói memória histórica e estabelece valores morais. Os textos sagrados não aspiram a ser tratados de física, mas fundamentos imutáveis de significado. A religião busca a permanência. A ciência, pelo contrário, procura a renovação constante. O seu objetivo é explicar fenómenos através de teorias sustentadas em evidência observável. Todo o conhecimento científico é provisório. As ideias defendidas hoje estarão obsoletas amanhã. A ciência abandona dogmas quando a evidência o exige.

Esta diferença fundamental torna ciência e religião esferas do saber independentes e incomparáveis. A ciência não pode refutar a religião, nem vice-versa. Com a filosofia, a questão é mais matizada. A filosofia não procura comprovar fenómenos por via da experimentação, mas analisá-los de forma crítica para alcançar compreensões mais profundas. O cientista que compreende a filosofia da ciência faz melhor ciência.

No início, Albert Einstein rejeitou que o Universo fosse dinâmico, embora as suas equações o sugerissem. O seu argumento era filosófico: «Um universo eterno e estático é mais estético». Morreu sem aceitar a mecânica quântica, disciplina que hoje sustenta tecnologias revolucionárias. Este exemplo ilustra como as conceções filosóficas influenciam a ciência.

ORIGEM, ESPAÇO-TEMPO E ENERGIA ESCURA

A teoria do Big Bang, a maior conceção cosmológica do nosso tempo, encerra múltiplas perspetivas filosóficas. A afirmação de que «o Universo teve um princípio» não é apenas técnica; representa uma posição ontológica profunda. A cosmologia não é só método científico aplicado a frio, mas também reflexo de como diferentes pessoas interpretam o cosmos segundo as suas intuições e cosmovisões. A cosmologia é ciência, mas também arte: interseção entre factos empíricos e imaginação humana.

Hoje, a cosmologia enfrenta três grandes problemas fundamentais. O primeiro é o da origem: porque é que há algo em vez de nada? Embora a teoria do Big Bang seja amplamente aceite, persistem questões sobre as condições iniciais, a origem da matéria e a assimetria entre matéria e antimatéria.

O segundo diz respeito à geometria do espaço-tempo: vivemos num Universo infinito ou finito? Poderá ter uma estrutura topológica exótica? O Universo pode ser mais pequeno do que imaginamos.

O terceiro é a energia escura, esse fenómeno misterioso que transformou a nossa compreensão da evolução cósmica. Porque é que o Universo se expande de forma acelerada? Precisaremos de uma física completamente nova?

A cosmologia convida-nos a uma viagem sem precedentes: observar o nascimento e a morte das estrelas, mergulhar em aglomerados de galáxias, escutar o eco do Big Bang e, talvez, encontrar respostas para as perguntas mais antigas da Humanidade. Como perguntou Copérnico: «Que haverá de mais belo do que o céu, que encerra toda a beleza?».

O Universo aguarda-nos. ■

Os cinco conceitos fundamentais da cosmologia

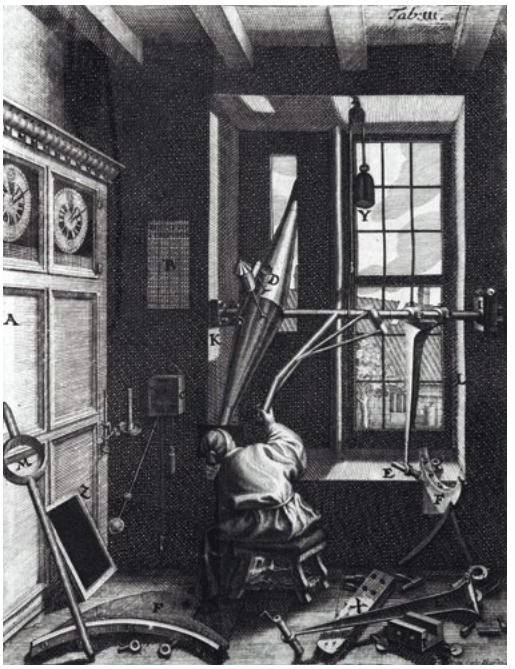
ISTOCK

O principal paradigma da cosmologia moderna assenta no Big Bang, reconhecido como a teoria científica mais bem-sucedida alguma vez concebida pelo ser humano. Esta ideia fulcral tem as suas raízes na primeira metade do século XX e, desde então, tem recebido, ano após ano, cada vez mais confirmação experimental a partir de diversas disciplinas. O seu postulado fundamental é simples, mas acarreta consequências inimagináveis: o universo teve um início e tem vindo a evoluir desde então.

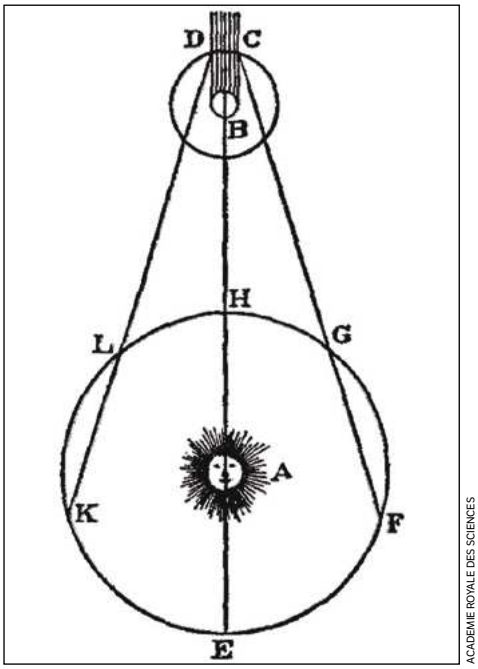
A teoria do Big Bang é tão vasta e possui tantos matizes que me seria impossível apresentar aqui todos os conceitos ou ideias que lhe deram vida. Contudo, considero essenciais cinco fenómenos que traçam um caminho bastante nítido: 1) a velocidade da luz, 2) a expansão do universo, 3) a velocidade galáctica e o *redshift*, 4) isotropia e homogeneidade, e 5) a radiação cósmica de fundo. Considere-os atentamente e mantenha-os presentes ao longo de todo o texto: serão o combustível da nossa nave espacial; não os abandone e volte a eles sempre que for necessário.

A VELOCIDADE DA LUZ

A velocidade da luz (c) é um fenómeno que permeia de forma significativa as observações astronómicas e constitui um dos parâmetros mais importantes em cosmologia. Foi medida pela primeira vez em 1676 pelo astrónomo dinamarquês Ole Christensen Rømer (1644-1710), que, ao estudar as luas de Júpiter, determinou que a luz se movia a uma velocidade finita. Atualmente, (c) é considerada uma constante, o que significa que se assume que o seu valor permanecerá sempre em 300 000 km/s, não mudou nem mudará com o tempo.

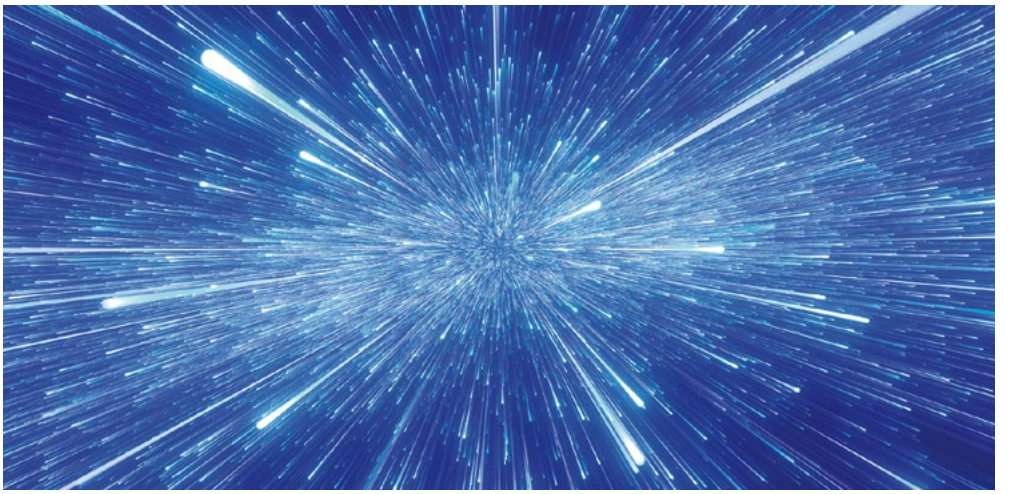


WELLCOME LIBRARY



ACADEMIE ROYALE DES SCIENCES

À esquerda, gravura de Ole Rømer no seu observatório de Copenhaga; à direita, o diagrama com que a Académie Royale des Sciences apresentou, em 1676, a sua experiência.



SHUTTERSTOCK

A velocidade finita da luz transforma o universo numa janela para o passado; até o Sol que vemos é o de há oito minutos.

Devido à sua velocidade finita, a luz demora um tempo determinado a viajar de um lugar para outro. Embora este facto seja impercetível à nossa pequena escala, nas vastas extensões cósmicas é claramente mensurável. Por exemplo, a luz do Sol demora cerca de oito minutos a percorrer o caminho até à Terra. Assim, sempre que observamos o Sol, vemo-lo tal como era oito minutos antes. Se o génio da lâmpada mágica fizesse desaparecer o astro-rei do nosso sistema solar, só o notaríamos oito minutos depois!

Este fenómeno tem consequências impactantes para as observações astronómicas que abrangem distâncias enormes: quando olhamos o espaço, estamos a olhar para trás no tempo! A galáxia de Andrómeda (M31), a mais próxima da nossa, a Via Láctea, encontra-se a aproximadamente 2,5 milhões de anos-luz, pelo que a sua luz demora 2,5 milhões de anos a chegar aos nossos telescópios. Quando Andrómeda emitiu a luz que detetamos hoje, o australopiteco, e provavelmente os primeiros indivíduos do género *Homo*, caminhavam pela Terra; não havia ferramentas desenvolvidas, não se conhecia o uso do fogo e, muito menos, tinham sido construídos telescópios. Quando a luz que Andrómeda está a emitir neste momento chegar à Terra, existe uma elevada probabilidade de já não haver humanos para a observarem. Haverá outras espécies?... provavelmente.

Em consequência, qualquer observação astronómica está sujeita a este olhar sobre o passado. Quanto mais longe observarmos, mais jovem veremos o universo. Aliás, alguns cientistas consideram que, se formos suficientemente arrojados, poderíamos ver tão longe que encontraríamos o nascimento do universo, apesar de isso ter ocorrido há milhares de milhões de anos.

A VELOCIDADE DA LUZ É UM FENÓMENO QUE PERMEIA DE FORMA SIGNIFICATIVA AS OBSERVAÇÕES ASTRONÓMICAS

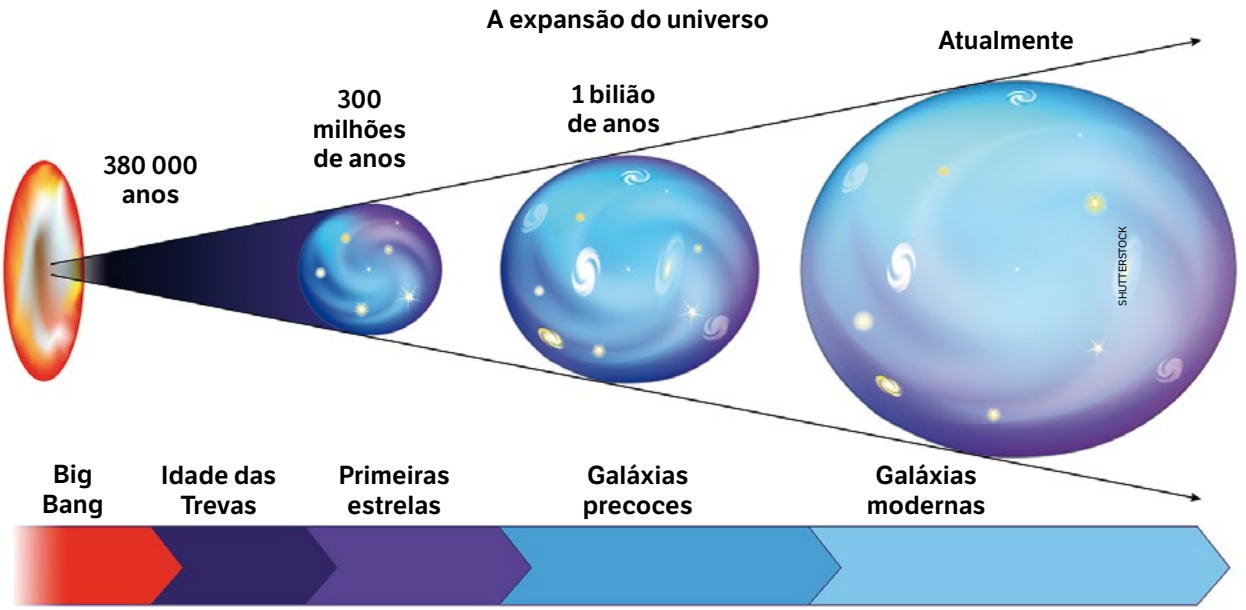


Diagrama sobre a evolução e a expansão do universo desde o Big Bang, com a Idade das Trevas, a formação das primeiras estrelas e o desenvolvimento das galáxias modernas.

A EXPANSÃO DO UNIVERSO

A descoberta da expansão do universo é uma história que se desenrolou, essencialmente, em três cenários. O primeiro ocorreu na Europa do início do século XX, quando um desconhecido funcionário de um escritório de patentes na Suíça publicou duas teorias, denominadas Relatividade Restrita (1905) e Relatividade Geral (1915), sem imaginar que iriam revolucionar de forma radical o mundo da ciência. O seu autor, Albert Einstein, talvez o cientista mais conhecido da história, estava convencido de que o universo era eterno e mantinha inalterado o seu tamanho.

Contudo, Alexander Friedmann (1888-1925), um dos matemáticos russos mais influentes de sempre, descobriu soluções das equações da relatividade que resultavam em universos dinâmicos que se expandiam ou contraíam com o tempo. Tudo isto enquanto, no campo de batalha, calculava trajetórias balísticas para o exército russo durante a Primeira Guerra Mundial.

Quando verificou que os resultados do seu colega eram matematicamente corretos, Einstein acrescentou às suas equações um termo *ad hoc*, conhecido desde então como a constante cosmológica (Λ), apenas com o objetivo de sustentar a sua ideia filosófica. Com a inclusão de Λ (lambda), o universo curvava-se sobre si

TUDO PARECIA INDICAR QUE UM UNIVERSO RELATIVISTA DEVERIA SER, EM ESSÊNCIA, UM UNIVERSO DINÂMICO

mesmo como uma esfera e conservava sempre o mesmo tamanho. O mecanismo é, mais ou menos, simples: Λ compensa, mediante uma força repulsiva, o efeito de atração da gravidade, que daria lugar ao universo dinâmico de Friedmann.

Não obstante, o matemático e físico holandês Willem de Sitter (1872-1934) demonstrou, em 1917, que o esforço técnico de Einstein não era coerente com um espaço-tempo sem matéria; um resultado mortal para a relatividade, cujo fundamento é o princípio de Mach. Como se não bastasse, tempo depois o astrónomo inglês Arthur Eddington (1882-1944) descobriu que o equilíbrio entre a gravidade e Λ nas equações da relatividade era tão precário que bastavam pequenas perturbações para que ocorresse uma expansão ou uma contração descontroladas. Ou o universo estava finissimamente calibrado, ou estaríamos a precipitar-nos demasiado depressa para a catástrofe!

Em conclusão, tudo parecia indicar, pelo menos no papel, que um universo relativista deveria ser, em essência, um universo dinâmico. Por sorte, não passou muito tempo até que a astronomia oferecesse as provas necessárias para dirimir a questão —e para que o criador da relatividade acabasse por considerar que lambda tinha sido o maior erro da sua vida.

O segundo cenário decorreu nos Estados Unidos, em 1920. A 26 de abril desse ano, a comunidade científica foi testemunha do «Grande Debate», uma intensa discussão sobre a natureza das nebulosas. Os contendores eram o astrónomo norte-americano Harlow Shapley (1885-1972), do Observatório do Monte Wilson, e o seu colega Heber Doust Curtis (1872-1942), do Observatório Lick da Universidade da Califórnia. Shapley defendia com fervor que as nebulosas —aqueles pequenos corpos de aparência difusa (como Andrómeda)— eram aglomerados de gás e estrelas que faziam parte da nossa galáxia. Curtis, por seu turno, sustentava que esses corpos celestes se encontravam fora da Via Láctea e que poderiam ser tão grandes quanto ela.

SMITHSONIAN INSTITUTION ARCHIVES

Harlow Shapley no seu gabinete (c. 1920). Foi um fervoroso defensor de que as nebulosas eram aglomerados de gás e estrelas que faziam parte da nossa galáxia.

LOWELL OBSERVATORY ARCHIVES

Um espetrógrafo é um instrumento científico concebido para dispersar a luz (ou outra radiação eletromagnética) de uma fonte nos seus diferentes comprimentos de onda.

O Grande Debate enquadrava-se numa das questões de maior interesse astronómico da época: a dimensão e os limites do universo. Embora a ideia de um universo--Via Láctea, com que o meu avô viveu, fosse bastante cómoda e aceite, para muitos era tentador pensar na possibilidade de existirem outros corpos celestes de igual ou maior magnitude. Apesar de não haver qualquer evidência, por que razão haveria a nossa galáxia de ser a única no universo?

Por fim, uma das descobertas mais importantes da ciência encarregou-se de pôr fim à questão. Na segunda década do século XX, o norte-americano Vesto Melvin Slipher (1875-1969) analisou os espetros de várias galáxias com o objetivo de medir a velocidade a que se moviam pelo espaço. Como resultado do seu extenuante trabalho, Slipher foi o primeiro cientista a obter dados que conduziram a uma conclusão inimaginável: o universo estava a expandir-se. Descobriu que o comprimento de onda da luz de uma galáxia que se move na direção da Terra se comprime, fazendo com que o seu espetro se observe mais azul. Pelo contrário, se a galáxia se afasta, o seu espetro desloca-se para o vermelho, devido ao alongamento do comprimento de onda da sua luz. Tirando partido deste fenómeno, este astrónomo conseguiu determinar a velocidade a que se aproximam ou se afastam algumas estrelas situadas nas nebulosas —aquelas sobre as quais Curtis e Shapley discutiam— e concluiu que quase todas se afastavam de nós. Em outras palavras, o universo ficava maior a cada segundo.

Não obstante, o crédito pela descoberta da expansão do universo não é concedido oficialmente a Slipher, mas sim a Edwin Hubble (1889-1953), considerado o pai da cosmologia observacional e o astrónomo mais importante do século XX. Em sua homenagem, um dos feitos tecnológicos mais relevantes da humanidade ostenta o seu nome: o *Telescópio Espacial Hubble* (*Hubble Space Telescope*, *HST*). Colocado em órbita a 24 de abril de 1990, o HST continua a ser, até aos nossos dias, um dos instrumentos de observação mais importantes para as ciências do espaço.

Hubble foi quem deu a estocada final no universo sonhado por Einstein. Entre 1926 e 1931, recorrendo ao Observatório do Monte Wilson, este astrónomo mediu a distância e a velocidade das galáxias próximas e chegou a duas conclusões que justificam a sua fama. Primeiro, comprovou que nebulosas como Andrómeda se situam tão longe que formam conjuntos autónomos de estrelas semelhantes à nossa galáxia, encerrando assim o Grande Debate a favor da hipótese de Curtis. Desde então, as nebulosas passaram a denominar-se galáxias. Em segundo lugar, em 1929 Hubble descobriu que a maioria das galáxias se afastava da nossa com uma relação diretamente proporcional entre distância e velocidade: «Uma galáxia que se encontre duas vezes mais longe do que outra afastar-se-á ao dobro da velocidade». Por outras palavras, a relação de Hubble indica que o universo se expande de forma homogénea.

O exemplo seguinte pode clarificar um pouco mais este paradigma fundamental da cosmologia. Suponha, por um momento, que estamos no centro de uma banda elástica que se estica em iguais proporções em todas as direções, duplicando o seu tamanho a cada minuto. Se, inicialmente, temos dois pontos situados a 1 m e a 2 m de nós, um minuto depois, assumindo que a banda se expande homogeneamente, ambos os pontos estarão a 2 m e 4 m, respetivamente.

Embora se possa pensar que a distância ao primeiro ponto aumentou apenas uma unidade —de um para dois metros— e ao segundo ponto em duas unidades —de dois para quatro metros—, isto não indica que a nossa banda se expanda mais no ponto mais afastado. Simplesmente, uma alteração no fator de escala faz com que os pontos mais distantes se afastem proporcionalmente mais com o tempo. Daqui decorre que a velocidade a que as galáxias se afastam não depende do movimento intrínseco de cada um desses corpos através do espaço, mas do próprio espaço.

Em 1543, Copérnico retirou a Terra do centro do sistema solar —a totalidade do universo, naquela altura. Mas, em 1931, Hubble foi muito mais longe: colocou a nossa galáxia num universo-mosaico gigantesco, repleto de milhares de milhões de galáxias, e lançou o pilar fundamental da cosmologia: «O espaço-tempo expande-se homogeneamente em todas as direções. O universo torna-se maior a cada instante». Que consequências passadas, presentes ou futuras poderá acarretar um universo em expansão?

Dias depois, é claro, Einstein viajou até ao Monte Wilson para ouvir a notícia da boca do próprio Hubble e, já agora, para espreitar por aquele telescópio —o mesmo que expandiu as fronteiras do cosmos e atiçou as nossas mais estranhas fantasias.

AS VELOCIDADES GALÁCTICAS E O *REDSHIFT* COSMOLÓGICO

Todas as galáxias possuem dois tipos de movimento: o movimento peculiar e o movimento de recessão. O primeiro refere-se ao deslocamento do próprio corpo através do espaço-tempo —o mesmo tipo de movimento que o leitor realiza

O CRÉDITO PELA DESCOBERTA DA EXPANSÃO DO UNIVERSO NÃO É CONCEDIDO OFICIALMENTE A SLIPHER, MAS A HUBBLE

quando vai de casa para o trabalho. De igual modo, a Terra executa um movimento peculiar em torno do Sol, e a nossa galáxia um, em direção ao Aglomerado de Virgem. Por outro lado, o movimento de recessão deve entender-se como o deslocamento aparente das galáxias devido à expansão do espaço-tempo, tal como Hubble descobriu. Se assumirmos que uma galáxia longínqua não possui qualquer tipo de movimento peculiar, observaremos, ainda assim, que ela se afasta de nós, porque o espaço entre ela e nós se torna maior.

De forma semelhante, à velocidade intrínseca da galáxia chama-se velocidade peculiar, e à associada à expansão do espaço, velocidade de recessão. A velocidade peculiar das galáxias próximas representa uma fração significativa da sua velocidade total, mas, nas galáxias distantes, mais de 95% da sua velocidade está associada apenas à velocidade de recessão. Isto pode resumir-se assim: «A velocidade a que uma galáxia se afasta de nós é a soma da sua velocidade peculiar com a sua velocidade de recessão».

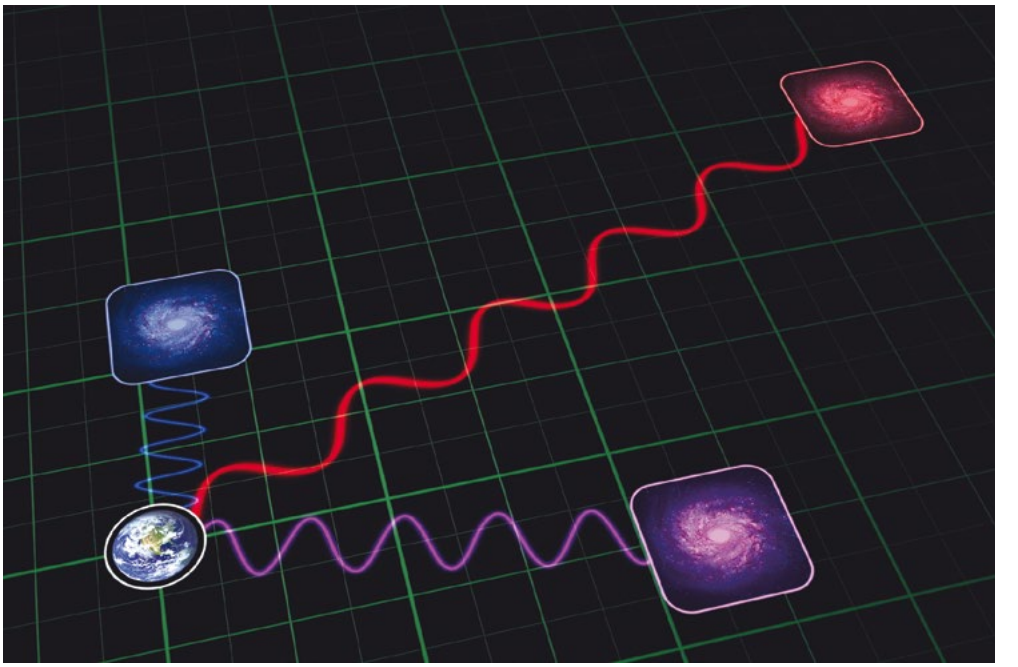
CARNEGIE SCIENCE

Hubble foi quem mudou a ideia do universo sonhado por Einstein, rompendo com a noção de um universo estático e eterno.

O que antecede permite estabelecer uma relação simples entre a velocidade de recessão e a lei de velocidade-distância postulada por Hubble: quanto mais longe estiver um corpo, maior é a sua velocidade de recessão. Pelo contrário, a velocidade peculiar de uma galáxia é aleatória e não depende, de forma alguma, da distância a que se encontra. Na prática, dado que a maioria das galáxias se encontra a grandes distâncias e, por conseguinte, a sua velocidade peculiar contribui apenas com uma pequena fração para a velocidade total, os cosmólogos assumem um modelo em que as galáxias estão fixas num espaço-tempo em expansão. Ao movimento neste modelo chama-se coordenadas comóveis.

Ora, para medir as velocidades galácticas, os astrónomos recorrem ao «desvio para o vermelho» (*redshift*, z), o mesmo que Vesto Slipher descobriu. Basicamente, este fenómeno é o alongamento do comprimento de onda da luz emitida por um corpo enquanto ele se afasta de nós. Quanto mais longe se encontre um corpo, quanto mais distância percorra a sua luz no caminho para os nossos teles-

O DESVIO PARA O VERMELHO PODE DEFINIR-SE COMO O INCREMENTO FRACIONAL DO COMPRIMENTO DE ONDA



NASA/JPL-CALTECH//R. HURT (CALTECH-IPAC)

O desvio para o vermelho cosmológico é um fenómeno fundamental em astronomia que demonstra que o universo está a expandir-se.

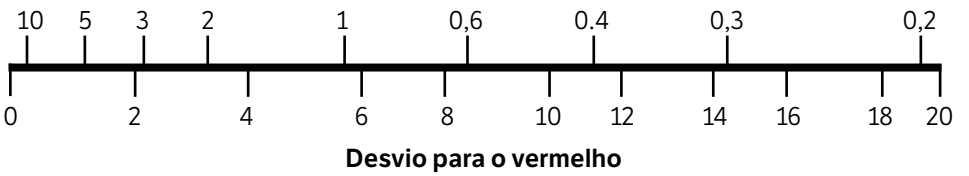
cópios, maior desvio z experimenta.

Então, se graças à expansão do espaço os astrónomos detetam um comprimento de onda modificado —mais longo do que o emitido—, como determinam o comprimento de onda original? Como saber quanto o sinal se deslocou para o vermelho? Eis aqui uma excelente premissa filosófica da cosmologia —creio que assim se lhe pode chamar—: o denominado princípio cosmológico, que exploraremos no ponto seguinte. Com o exposto até ao momento, é possível precisar alguns conceitos e relações. Em primeiro lugar, o desvio para o vermelho pode definir-se como o incremento fracional do comprimento de onda: $z = (\lambda_o - \lambda)/\lambda$, onde λ é o comprimento de onda emitido e λ_o o comprimento de onda recebido. Assim, como as galáxias são constituídas principalmente por hidrogénio, um elemento cujo espetro (comprimentos de emissão) podemos medir aqui mesmo na Terra, é possível determinar quanto se deslocou para o vermelho quando é detetado a partir de uma fonte astronómica.

Adicionalmente, quando se calcula o valor de z, pode estimar-se a velocidade da fonte mediante a relação: $V = c\,z$. Conhecendo z e V, podemos determinar a distância, graças à lei de velocidade-distância que deu a Hubble o título de pai do universo em expansão: $v = H\,d$, onde v é a velocidade, H é o parâmetro de Hubble e d, a distância.

O desvio para o vermelho ainda nos pode oferecer outros dados interessantes. Se tiver em conta que olhar o espaço é olhar para o passado, torna-se fácil relacionar z com uma «medida de tempo», um valor que indica a idade do universo no momento da emissão. Por exemplo, um corpo com um desvio para o vermelho de 6 emitiu a sua luz quando o universo tinha pouco menos de mil

SHUTTERSTOCK



Equivalência entre o desvio para o vermelho e a idade do universo. O valor do desvio para o vermelho (z) de um corpo celeste indica também a idade que o universo tinha quando a luz que está a ser analisada foi emitida. Isto significa que o desvio para o vermelho também pode ser utilizado como uma medida de tempo ou um indicador de épocas cósmicas. Um z = 0 equivale a ~13 700 Ma (o momento atual).

milhões de anos. Em resumo, medir o desvio para o vermelho de um corpo permite conhecer: 1) quanto se expandiu o universo desde a emissão da luz; 2) a velocidade e a distância da fonte; e 3) a idade do universo no momento da emissão. Por exemplo, se uma galáxia possui z = 0,1, pode estimar-se que se afasta de nós a 30 000 km/s, velocidade que corresponde a uma distância de cerca de 1 300 milhões de anos-luz. Convido-o a experimentar com outro valor de z e a utilizar as equações apresentadas acima ou a «calculadora de *redshift*s». Verificará que este exercício simples lhe permitirá obter dados adicionais sobre fontes astronómicas quando abordarmos alguns z no segundo avatar.

Finalmente, é fundamental ter em conta que os dados obtidos sobre a posição ou distância de uma galáxia são valores que correspondem ao passado, não ao momento atual. Isto significa que é impossível medir diretamente a distância a que se encontra uma galáxia longínqua no presente —porque a observamos onde estava no passado—, sendo necessário utilizar as equações da expansão do universo para estimar a sua distância atual.

Em suma, o desvio para o vermelho é uma das propriedades observacionais mais importantes na cosmologia e num espaço-tempo dinâmico. Se o universo fosse estático, não haveria «*redshift* cosmológico», mas um «*redshift* do tipo Doppler», produto da velocidade peculiar das galáxias. Por outro lado, se todas as galáxias estivessem estáticas —tanto peculiarmente como recesivamente—, a sua luz chegaria até nós sem qualquer deslocamento no espetro. Em 1955, os astrónomos já dispunham do z de quase mil galáxias e, atualmente, conta-se com os valores de mais de meio milhão.

ISOTROPIA E HOMOGENEIDADE

Do meu ponto de vista, a isotropia e a homogeneidade são os pressupostos filosóficos mais importantes da cosmologia. A isotropia pode definir-se como um estado em que qualquer direção para a qual um observador, situado num ponto qualquer, olhe, lhe pareça igual às demais. Por exemplo, se uma pessoa se encontra num barco em pleno mar, ou no meio de um imenso prado, verá o mesmo em qualquer direção: água ou erva, em configurações aleatórias. Nessas condições, o observador pode declarar que todo o seu entorno é isotrópico e, se não tiver uma bússola no bolso, é provável que não encontre o caminho de regresso a casa.

Pelo contrário, quando erguemos o olhar para observar o céu noturno a olho nu, este parece anisotrópico. As estrelas alinham-se de diferentes formas —a que chamamos constelações— e permitem distinguir as regiões do céu; o sul não é igual ao norte. Do mesmo modo, quando os astrónomos apontam os seus telescópios para observar o universo próximo, poderão ver estrelas por aqui, alguns enxames globulares por ali, outras galáxias numa certa direção, etc. No entanto, quando se observa o universo longínquo, acima de 1 000 milhões de anos-luz, ou 300 Mpc, este torna-se isotrópico. Às grandes escalas, qualquer direção do espaço parece igual às demais, em qualquer comprimento de onda —desde as ondas de rádio até aos raios gama—, de tal forma que um astrónomo não conseguirá distinguir entre diferentes regiões do céu.

Com base nesta propriedade, o astrofísico e cosmólogo britânico Edward Arthur Milne (1896-1950) propôs, em 1933, o conceito de Princípio cosmológico —um termo que, como aficionado por astronomia ou cosmologia, nunca deve esquecer. Em primeiro lugar, este princípio indica que as leis da física permanecem iguais em todas as épocas e lugares do universo. É por esta razão que as medições de espetros químicos aqui na Terra se extrapolam ao universo como medida do espetro de emissão de um corpo. Dito de outro modo, assume-se que o espetro do hidrogénio aqui na Terra é igual ao espetro do hidrogénio numa galáxia a milhões de anos-luz de distância. Em segundo lugar, este princípio declara que, à parte irregularidades locais, o universo é igual em qualquer lugar. Note-se que há uma diferença entre é, como expressa o princípio cosmológico, e parece, como indica o princípio da isotropia. Este é o ponto de partida para chegar ao conceito de homogeneidade.

Creio que uma experiência mental pode ajudar aqui. Imagine que é um observador terrestre que vê o céu igual em qualquer direção. Então declara: «Oh, o universo é isotrópico!». Muito bem. Agora, suponha que eu me lanço numa viagem intergaláctica e que tenho a capacidade de comunicar instantaneamente consigo —sei que a velocidade da luz o impede; imagine apenas. Durante o meu percurso, vou-lhe reportando que, aonde quer que chegue, encontro distribuições de galáxias semelhantes. Além disso, que, de qualquer lugar onde me

OS DADOS OBTIDOS SOBRE A POSIÇÃO OU DISTÂNCIA DE UMA GALÁXIA CORRESPONDEM AO PASSADO

detenha, observo que, acima dos 300 Mpc, o universo parece igual em qualquer direção; o mesmo que observa na Terra. Como viajante no espaço, posso dizer: «Oh, que maravilha, o universo é homogéneo!». Esta afirmação implica que a configuração em grande escala do universo é e parece invariável, independentemente da minha posição. Você, na Terra, ao receber o meu relatório, rejubila e diz: «Suspeitava... como o universo parece igual em qualquer direção, deverá também ser igual em qualquer lugar. Graças ao meu colega, comprovei-o. Agora posso dizer que o universo é isotrópico e homogéneo».

O princípio cosmológico de Milne é uma generalização —uma suposição!— realizada a partir de uma condição observável: a isotropia em grande escala do universo. A homogeneidade é uma caraterística que nenhum viajante intergaláctico pôde ainda comprovar; ninguém se deslocou a 1 000 milhões de anos-luz da Terra para verificar se o universo é e parece igual a partir daí. Como observadores terrestres, apenas podemos declarar isotropia. Se quiséssemos declarar homogeneidade, teríamos de nos mover a grandes escalas pelo espaço —algo impossível neste momento.

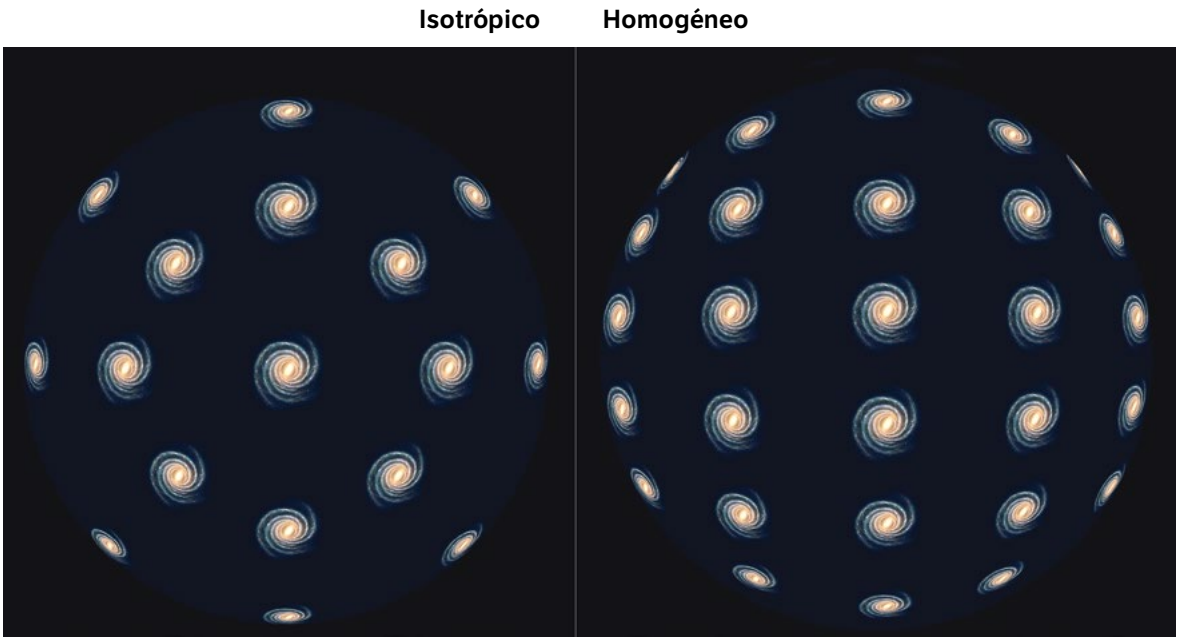
Vou agora à pergunta que provavelmente tem em mente: que diferença há entre o observador estático e o observador em movimento? Não haverá forma de um observador terrestre declarar homogeneidade? São boas perguntas e a resposta à segunda é um rotundo não. Lamento recordá-lo, mas quero ter a certeza de que tem presente que, quando observamos o espaço, estamos a olhar para o passado. Portanto, o universo parece igual em todas as direções, mas não é igual em cada ponto. As diferentes etapas da evolução do cosmos fazem com que, no universo próximo, vejamos galáxias maduras, enquanto mais longe vemos galáxias jovens —regiões, definitivamente, bem distintas. Por outras palavras, como observadores terrestres, na realidade vemos um universo não homogéneo.

Note-se que a limitação aqui é c. Se a velocidade da luz fosse infinita, veríamos todo o universo tal como é atualmente e, se víssemos que em qualquer lugar o universo é igual, poderíamos declarar que é homogéneo. Contudo, como sabemos que estamos a olhar para o passado —observando o universo em diferentes etapas de evolução—, «assumimos que essas regiões evoluíram tal como a nossa e, portanto, embora não as vejamos no presente, devem ser iguais!».

Isto conduz-nos a uma conclusão inevitável: a velocidade finita da luz impede-nos de provar que o universo é homogéneo. Adicionalmente, devido ao horizonte de partículas, há regiões fora do nosso cone de luz que impossibilitam determinar a homogeneidade do universo para além da escala visível. Tudo o que antecede indica que, quando os cosmólogos recorrem a modelos de universo homogéneos, estão a efetuar uma generalização: dada a isotropia observável, deve existir uma homogeneidade inobservável.

Por outro lado, é possível conceber espaços homogéneos mas anisotrópicos — embora, ao que tudo indica, não seja o caso do nosso universo. Tal seria o caso

PARA QUE EXISTA ISOTROPIA TEM DE EXISTIR ALEATORIEDADE NA DISTRIBUIÇÃO E NO EIXO DOS CORPOS



SHUTTERSTOCK

Num universo isotrópico, vê-se igual em todas as direções a partir do centro, mas a sua densidade muda. Num universo homogéneo, a matéria distribui-se de forma uniforme, independentemente de onde se esteja.

se, numa viagem intergaláctica, a *Enterprise* constatasse que todos os lugares cósmicos são iguais, mas parecem diferentes. Em que circunstâncias poderia isto ocorrer? Se assumirmos que todas as galáxias têm o mesmo eixo de rotação. Ao colocar-me na posição X, observá-las-ei de lado, quase como objetos unidimensionais, enquanto que, a partir da posição Y, vê-las-ei de baixo, como elipses ou espirais.

A mesma situação pode ocorrer se imaginarmos que, no prado em que nos encontramos perdidos, sopra uma ventania forte e temível: a erva perderá a sua direção aleatória e dispor-se-á toda na mesma direção, a do vento. Nesta ocasião, poderia ver o mesmo onde quer que se situe —erva (homogeneidade)—, mas, de uma direção, vê-la-á na horizontal e, de outra, voltada para si (anisotropia). Isto leva a outra conclusão importante: para que exista isotropia tem de existir aleatoriedade na distribuição e no eixo dos corpos.

Para resumir, os efeitos mais significativos do princípio cosmológico são dois. Primeiro, assume-se que as leis da física e a evolução do universo são constantes em todos os lugares. Esta suposição é fundamental, porque facilita enormemente o desenvolvimento de modelos cosmológicos, permitindo-nos fazer previsões e simulações sobre o passado, o presente e o futuro do universo. Em segundo lugar, a noção de um universo não homogéneo implica, por motivos ainda não inteiramente claros, que poderíamos encontrar-nos num lugar especial do espaço. Esta ideia contrasta com as lições que aprendemos com astrónomos como Copérnico e Hubble, que nos ensinaram a pensar a Terra como apenas mais um ponto no vasto tecido do cosmos —não como o seu centro nem como uma localização particularmente privilegiada. Apesar disso, devemos recordar que a

ENCONTRARAM UMA PROVA DE QUE O UNIVERSO FOI, NO PASSADO, MUITO MAIS QUENTE DO QUE É AGORA

ciência está sempre aberta a novas evidências. Embora a ideia de um lugar especial possa parecer improvável com base no conhecimento atual, as possibilidades nunca são nulas.

A RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO

O último conceito que abordarei é uma das descobertas científicas mais fascinantes da história. Coloquemo-nos nos anos cinquenta do século passado. Depois de Einstein, Friedmann e Hubble, a nova ciência do século XX —a cosmologia— tentava articular as recentes descobertas astronómicas com a relatividade geral, e os esforços para explicar um universo coerente continuavam a multiplicar-se.

Nesse contexto, Fred Hoyle (1915-2001), um destacado astrofísico do Trinity College, da Universidade de Cambridge, em Inglaterra, apoiou-se em cálculos incorretos de Hubble sobre a idade do universo e surpreendeu o mundo com a sua «Teoria do Estado Estacionário». Hoyle sustentava que o universo era «um ente eterno, que sempre existiu e que criava constantemente matéria». Como apaixonado divulgador de ciência, sempre que tinha oportunidade, recorria a programas de rádio, fóruns, debates e congressos para apresentar a sua teoria.

Em várias das suas aparições, Hoyle sofreu o azorrague —por assim dizer— do físico soviético George Gamow (1904-1968), admirador de uma hipótese oposta sobre o universo. Com base na física nuclear e na hipótese de um sacerdote, este cientista propunha que «o universo teve um princípio». Juntamente com os seus alunos Ralph Alpher e Robert Herman, Gamow previu que, se o universo tivesse começado como ele o imaginava, com uma espécie de explosão, deveria existir um calor, uma radiação remanescente desse acontecimento. Do seu ponto de vista, o universo não deveria ser suficientemente velho para que essa estranha radiação tivesse desaparecido. Infelizmente, na década de 1950 ninguém dispunha de instrumentos capazes de confirmar esta hipótese.

Quando tudo parecia estagnado num debate interminável, os cientistas encontraram uma prova contundente —quase tão antiga quanto o próprio universo— que condenou uma das duas teorias ao caixote do lixo da História. Ninguém imaginou que, desde há milhões de anos, o cosmos sussurrava uma resposta.

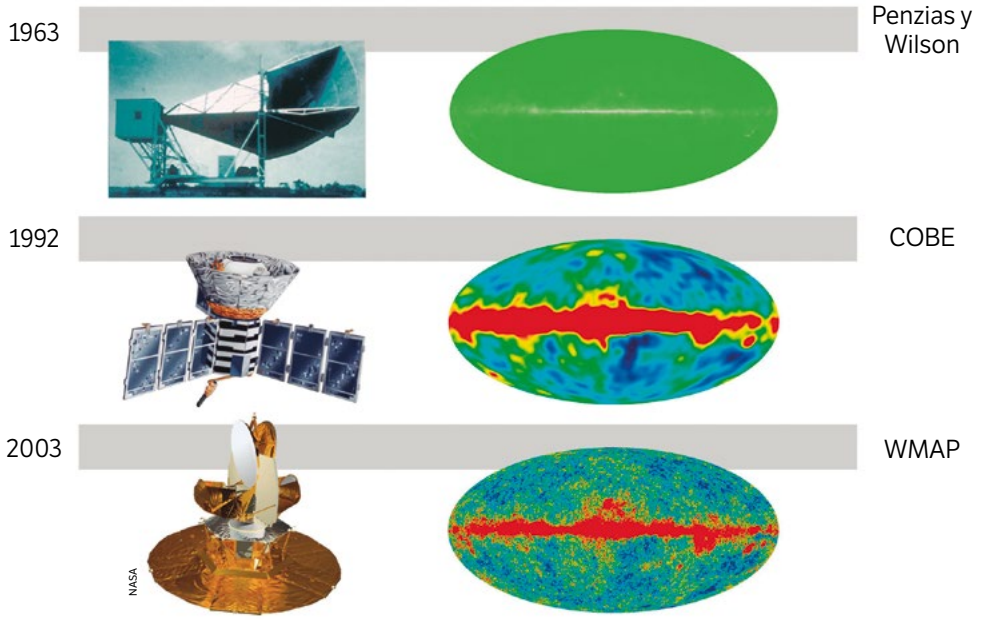
Em 1965, Arno Penzias (1933-) e Robert Wilson (1936-) eram dois cientistas que não trabalhavam em cosmologia, mas num laboratório de comunicações da Bell. Testando uma antena de comunicações recém-construída, detetavam, na banda das micro-ondas, uma interferência constante, independentemente do lugar para onde apontassem. Tratava-se de um ruído semelhante ao de um rádio ou de um televisor quando sintoniza um canal vazio. A sua primeira hipótese foi a de que o problema era causado por «material branco dielétrico», isto é, os dejetos de um

grupo de pombos que tinham feito ninho na antena. No entanto, depois de limparem os dejetos em várias ocasiões, a estranha interferência persistia.

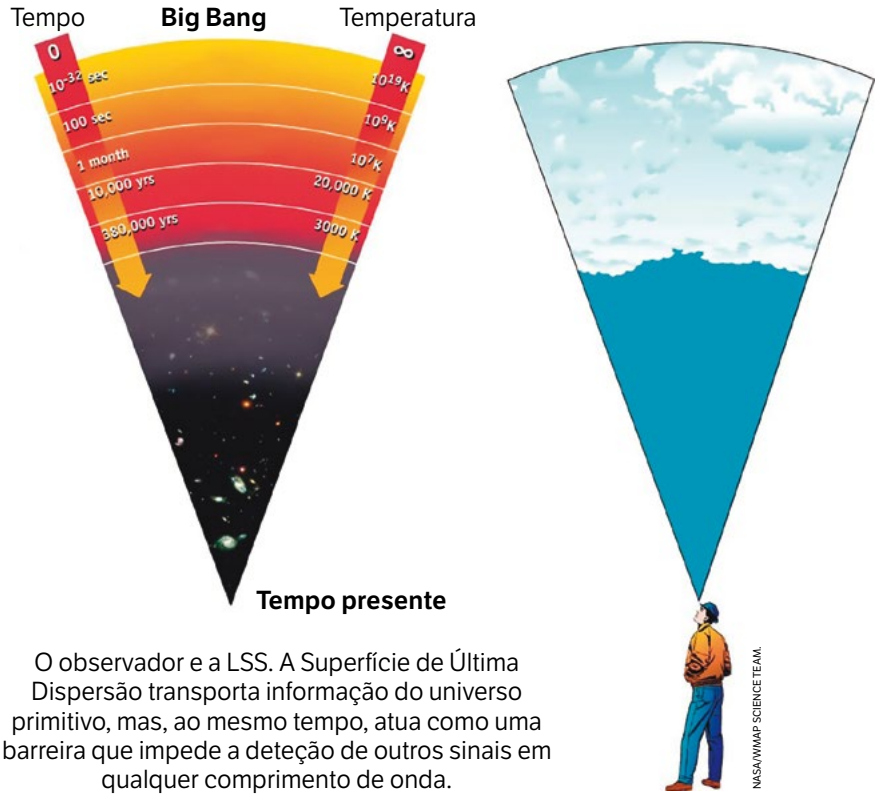
Após vários meses, e quando as ideias sobre a causa do problema se esgotavam, um colega recomendou-lhes que contactassem Robert Dicke (1916-1997), um importante físico experimental norte-americano da Universidade de Princeton, que andava à procura do sinal que Gamow e os seus alunos tinham postulado. Enquanto Dicke se encontrava numa reunião de trabalho, tocou o telefone. Após alguns minutos do outro lado da linha —conta a lenda—, Wilson pousou o auscultador e disse ao seu colega, que o olhava intrigado: «Ou andámos a detetar cocó de pombo, ou descobrimos o nascimento do universo».

Efetivamente, os cientistas da Bell tinham detetado por acaso aquilo que Dicke e os seus colaboradores procuravam, o que Gamow, Alpher e Herman haviam previsto. Encontraram uma prova de que o universo foi, no passado, muito mais quente do que é agora; descobriram que o universo tem vindo a arrefecer há milhares de milhões de anos. A este sinal chama-se «radiação cósmica de fundo» (*Cosmic Microwave Background*, *CMB*). O CMB é a Pedra de Roseta da cosmologia; o que o ADN é para a genética. Desde a sua deteção, é a fonte de informação mais amplamente estudada em todas as ciências do espaço.

Wilson e a equipa de Princeton publicaram as suas conclusões em artigos independentes no *Astrophysical Journal*, em 1965, e Penzias e Wilson foram ga-



O refinamento na deteção do CMB. Desde a sua descoberta, a deteção do sinal da LSS melhorou substancialmente. O *Explorador do Fundo Cósmico* (*Cosmic Background Explorer*, *COBE*) foi o primeiro satélite espacial utilizado para medir este sinal, que 11 anos depois seria substancialmente melhorado pela sonda *Wilkinson de Anisotropia por Micro-ondas* (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*, *WMAP*). A faixa que se observa ao centro é o ruído do centro galáctico, que pode ser extraído. Os registos mais recentes são os realizados pela sonda espacial *Planck* (2013-2014), com uma resolução 10 vezes superior à do *WMAP*.



O observador e a LSS. A Superfície de Última Dispersão transporta informação do universo primitivo, mas, ao mesmo tempo, atua como uma barreira que impede a deteção de outros sinais em qualquer comprimento de onda.

lardoados com o Prémio Nobel da Física em 1978 «pela descoberta da radiação cósmica de fundo de micro-ondas».

Brevemente: o CMB é o registo que captamos de um fenómeno denominado «Superfície de Última Dispersão» (*Last Scattering Surface*, *LSS*), uma intensa luz que iluminou todo o universo —antes opaco e escuro— 380 000 anos após o seu hipotético nascimento. Este fenómeno ocorreu numa etapa da evolução cósmica denominada Recombinação, quando o universo tinha apenas 0,003% da sua idade atual.

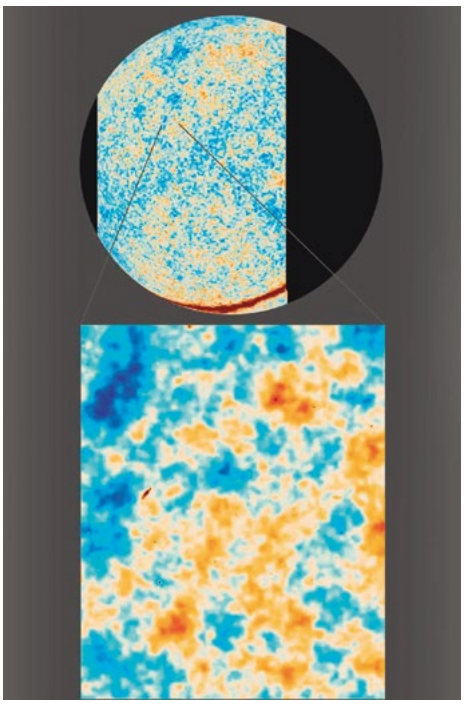
Neste texto poderá considerar como homólogos os termos recombinação, LSS e CMB. Vale a pena esclarecer que a recombinação é um fenómeno subatómico que deu origem à formação da LSS, cuja deteção, milhões de anos depois, é o CMB. Ao longo deste especial, voltaremos repetidamente a estes termos.

Se estava a ficar com sono, é importante que desperte e preste muita atenção ao que se segue. O modelo cosmológico do Big Bang postula que, nas suas primeiras etapas, o universo estava muito quente. Nesse estado, os átomos encontravam-se ionizados, isto é, os eletrões não estavam ligados aos núcleos. Deste modo, os eletrões livres interagem fortemente com os fotões, impedindo que estes últimos se dispersem livremente pelo espaço. Por esta razão, com os fotões «aprisionados», o universo era opaco.

No entanto, a contínua expansão do universo levou a que a sua temperatura diminuísse pouco a pouco. No momento em que atingiu os 3 000 $_{o}$K , produziu-se a recombinação. A essa temperatura, os eletrões já não possuíam a energia necessária para escapar à interação eletromagnética que estabelecem com os núcleos atómicos, devido à diferença de cargas elétricas —um eletrão é negativo e os núcleos atómicos, positivos. Do mesmo modo, os fotões também não dispunham

de energia suficiente para quebrar estas novas ligações entre núcleos atómicos e eletrões. Então, algo espetacular ocorreu: formaram-se os átomos —para sermos precisos, átomos neutros. Deste modo, os eletrões deixaram de estorvar os fotões, que, a partir desse instante, quase em simultâneo em todo o universo, puderam viajar livremente. O universo iluminou-se com o clarão a que chamamos LSS.

Esta luz, que detetamos no presente na região das micro-ondas, transporta informação do universo primordial mas, por sua vez, constitui uma barreira através da qual não se pode observar em qualquer comprimento de onda. Para entender porquê, imagine que a LSS é o mesmo que observar um céu nublado. A única luz que chega aos nossos olhos é a que provém da superfície da nuvem mais próxima de nós; não conseguimos ver o que há dentro ou atrás da nuvem. O mesmo acontece quando olhamos para o Sol: apenas observamos a sua camada mais externa, os fotões da sua última superfície de dispersão, que nos impedem de ver o seu interior. Do mesmo modo, a recombinação fez com que o universo formasse uma barreira luminosa que nos impede de ver mais fundo —mais atrás no tempo.



ACT COLLABORATION; ESA/PLANCK COLLABORATION

O Fundo Cósmico de Micro-ondas é o «eco» —ou a luz mais antiga— do universo, cerca de 380 000 anos após o Big Bang.

Neste momento, podemos encontrar 400 milhões de fotões da LSS por centímetro cúbico, no espetro das micro-ondas: o CMB. No entanto, a luz emitida naquela época correspondia ao espetro do infravermelho. Mais uma vez, a expansão do universo fez o seu trabalho, alongando o comprimento de onda desses fotões primordiais até às micro-ondas e arrefecendo-os dos 3 000 ^{o}K para cerca de 2,7 ^{o}K.

O CMB deve entender-se como uma cartografia bidimensional do universo primordial expressa em termos de temperatura. As diferentes cores ou tonalidades são pequenas variações de temperatura entre 2,7249–2,7251 ^{o}K. Estas ínfimas diferenças entre cada ponto —da ordem de uma parte em 500— denominam-se anisotropias do CMB, e o estudo destas pequenas diferenças gerou, nas últimas décadas, milhares de artigos científicos e dezenas de hipóteses cosmológicas. O

A CONTÍNUA EXPANSÃO DO UNIVERSO LEVOU A QUE A SUA TEMPERATURA DIMINUÍSSE POUCO A POUCO

leitor interessado neste assunto em particular, pode consultar o Legacy Archive for *Microwave Background Data Analysis* (*LAMBDA*), da NASA, para conhecer dados adicionais ou técnicos de primeira mão.

No primeiro avatar, aprofundaremos um pouco mais. Para já, posso adiantar que se considera que as anisotropias do CMB resultam essencialmente de flutuações de densidade no universo primordial. Um fotão proveniente de uma região ligeiramente mais densa perderá uma fração da sua energia na sua luta contra a gravidade, razão pela qual será detetado mais frio. Pelo contrário, fotões emitidos em regiões menos densas serão pontos mais quentes. Se o universo fosse perfeitamente homogéneo e isotrópico, todos os fotões do CMB chegariam com a mesma energia —ainda que, em rigor, não teriam lugar algum aonde chegar. Num universo perfeitamente homogéneo e isotrópico não se formam galáxias, estrelas, planetas, cosmólogos nem aficionados da ciência.

Por último, cabe notar que, sendo um fenómeno luminoso, o CMB traz também associado um desvio para o vermelho de z ~ 1 100, e calcularam-se valores para o raio da sua superfície que variam entre Rlss = 26 Gpc e 53 Gpc. Quanto mais precisos forem estes dados, mais certeira será a nossa estimativa das dimensões do universo atual.

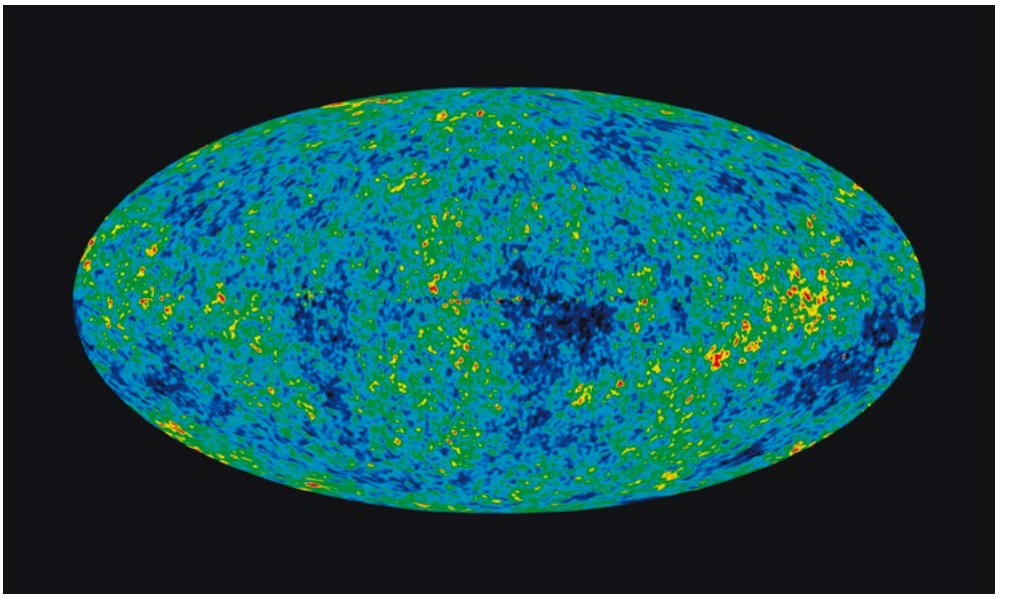
Um dos grandes prazeres da minha vida foi conhecer Robert Wilson, durante a IV conferência Starmus, em Trondheim, Noruega (https://www.starmus.com/). É a melhor conferência científica (dirigida ao público em geral) em que participei. Em maio de 2024, celebrou-se em Bratislava, Eslováquia, com um tema de grande atualidade: «O futuro do nosso planeta». Em 2025, teve lugar em La Palma, Espanha, como homenagem aos 100 anos do nascimento da teoria quântica. Penso que é uma experiência em que todo o aficionado da ciência deveria participar pelo menos uma vez na vida.

Foi gratificante conversar alguns minutos com Robert Wilson enquanto comíamos um donut e o café que nos ofereciam como reforço. É uma pessoa tranquila e humilde, com visões interessantes sobre o futuro da cosmologia. Claro que, desde que comprei o meu bilhete para a conferência, sabia da sua presença, juntamente com outros laureados com o Nobel na área da cosmologia, como George Smoot e Adam Riess.

Uma das minhas motivações para assistir a tal conferência foi ver, ao vivo e a cores, Stephen Hawking. Não o consegui, porém. A sua participação presencial foi cancelada por motivos de saúde, mas tivemos a sorte de desfrutar do seu humor peculiar através de uma videoconferência. Não foi menos gratificante encontrar-me com gigantes da ciência como Neil deGrasse Tyson, Brian Cox, Brian Greene e outras personalidades, incluindo astronautas das missões Apolo.

Voltando ao ponto: os conceitos que explorámos ao longo deste capítulo serão as cápsulas que guiarão grande parte da nossa viagem pelos avatares da cosmologia moderna. Todos fazem parte de um complexo puzzle, de um compêndio

AS ANISOTROPIAS DO CMB RESULTAM ESSENCIALMENTE DE FLUTUAÇÕES DE DENSIDADE NO UNIVERSO PRIMORDIAL



NASA

Mapa completo do Fundo Cósmico de Micro-ondas (CMB) obtido pela missão *WMAP* da NASA. Esta imagem é a prova definitiva do princípio cosmológico.

de milhares de histórias, esforços e descobertas ao longo deste século. Exigiria a escrita de tomos inteiros para tentar encaixar peça a peça e explicitar todos os detalhes, pelo que compreenderá porque não o fiz.

A velocidade da luz, o problema da expansão do universo e o desvio para o vermelho são variáveis que se conjugam para transformar a tarefa de observar o espaço num verdadeiro desafio para a astronomia. Para além de recolher a luz com sofisticados instrumentos de observação, espaciais e terrestres, os astrónomos têm de realizar cálculos matemáticos para dar sentido às suas observações. Por sua vez, a isotropia e a homogeneidade, conjugadas com os dados obtidos do CMB, são uma importante fonte de reflexão para os cosmólogos. A radiação descoberta por Penzias e Wilson mudou, de forma radical, a maneira de obter informação sobre o universo primordial e tem um potencial enorme para impulsionar —ou descartar— o trabalho de quem modela o cosmos na mente.

À medida que avançar na leitura, encontrará peças adicionais de informação que se entrelaçarão com o que já foi exposto, construindo um mosaico cada vez mais completo do nosso conhecimento sobre o universo. Até agora, o meu objetivo foi simplesmente estabelecer um enquadramento assente em cinco conceitos-chave que considero essenciais para toda a experiência de leitura. Estes conceitos serão os faróis que iluminarão o nosso caminho através da escuridão do cosmos, as ferramentas com que iremos desvendar os mistérios que se nos apresentarem. Exorto-o a mantê-los sempre presentes, a revisitá-los e a refletir sobre eles à medida que avança no texto. Não hesite em voltar a este capítulo sempre que necessitar. É possível que cada leitura revele novas camadas de significado, sobretudo à medida que for adquirindo mais informação e perspetiva ao longo deste especial. Considere-o, pois, um porto seguro ao qual pode regressar sempre que as águas da cosmologia se tornarem demasiado tumultuosas. ■

A cosmologia do Big Bang

Porque há algo em vez de nada? Foi a pergunta que se colocou Gottfried Leibniz (1646-1716), o matemático e filósofo alemão contemporâneo de Newton. Desde então, eminentes pensadores têm-se lançado na empresa de lhe dar uma resposta clara e convincente.

Em traços largos, podemos dizer que, como problema filosófico, esta pergunta remete-nos para as reflexões gregas ou medievais sobre a origem do tempo e do mundo. Aristóteles (384-322 a.C.) defendia um princípio basilar: do nada, nada surge. Por conseguinte, era ilógico pensar num começo para o universo; não podia ter existido um «antes», um momento em que nada existisse. Para ele, o cosmos era eterno no passado e no futuro, mas finito em dimensão. Acreditava que todo o universo estava contido em esferas concêntricas, onde se situavam todos os corpos celestes que giravam em torno da Terra.

Mais tarde, a maioria dos teólogos cristãos, como Santo Agostinho (354-430), contrariou a noção aristotélica. Afirmavam que o único eterno era Deus, que em algum momento indefinido trouxe o espaço e o tempo à existência. Como o próprio tempo fora criado por Deus, não fazia sentido perguntar por um momento anterior à criação. Alguns cristãos foram mais ousados e tentaram oferecer «dados» mais precisos. Por exemplo, em 1658, o arcebispo James Ussher calculou que o universo fora criado às oito da noite de 22 de outubro do ano 4004 a.C.

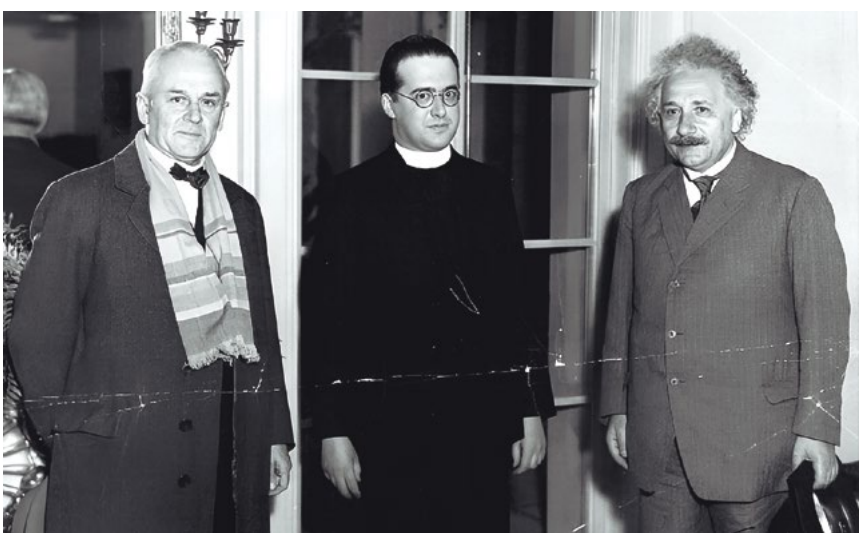
SHUTTERSTOCK

Agora, enquanto problema científico, a pergunta de Leibniz é muito mais recente. Paradoxalmente, uma das respostas mais conhecidas provém de um religioso, um jesuíta chamado Georges Lemaître (1894-1966). Este sacerdote e cientista belga também percebeu que a teoria da relatividade geral não comportava um universo estático, como pretendia o seu autor. Assim, quando tomou conhecimento da descoberta da expansão do universo, Lemaître fez um raciocínio simples, tão simples que a sua conclusão é surpreendente, e pode soar mais ou menos assim:

> Se o universo se expande, ontem era menor do que é hoje. Há um ano era ainda mais pequeno. Assim, se rebobinarmos o filme o suficiente, veremos os corpos celestes aproximarem-se uns dos outros quanto mais recuarmos no passado. Finalmente, chegará um ponto remoto e imemorial, mas finito no passado, em que toda a matéria/energia do universo esteve concentrada num único lugar, um ponto infinitesimal.

Para Lemaître, no passado existiu um ponto do espaço-tempo, uma espécie de ovo cósmico extremamente quente e denso, um átomo primordial, como lhe chamou, que explodiu e pôs o universo em marcha. Entre 24 e 29 de outubro de 1927, durante o quinto Congresso de Solvay, em Bruxelas, o jesuíta expôs a sua conclusão a Einstein, que lhe respondeu: «Os seus cálculos estão corretos, mas a sua conclusão é abominável». Contudo, aquela abominação viria a tornar-se a teoria mais fascinante de toda a ciência.

Recorda-se de Fred Hoyle? Pois foi precisamente ele, num dos seus populares programas de rádio, em 1949, quem batizou a proposta de Lemaître como teoria do Big Bang. Os historiadores da ciência consideram que utilizou o termo de forma trocista, mas a verdade é que acertou em cheio. Em agosto de 1993, a revista de divulgação astronómica *Sky and Telescope* promoveu um concurso público para encontrar um nome melhor para a teoria. O já mundialmente conhecido astrónomo Carl Sagan fazia parte do júri. Não obstante, depois de examinar mais de 10 000 nomes, nenhum convenceu os jurados e o prémio ficou deserto.



CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Os físicos Robert A. Millikan, o sacerdote e astrónomo belga Georges Lemaître (pai da teoria do Big Bang) e Albert Einstein durante uma visita a Pasadena, em 1933.

PARA LEMAÎTRE, NO PASSADO EXISTIU UM PONTO DE ESPAÇO-TEMPO, UMA ESPÉCIE DE OVO CÓSMICO

Lemaître estava moribundo num hospital da Bélgica quando o informaram de que dois cientistas norte-americanos tinham descoberto a radiação remanescente que Gamow previra, com base na sua teoria da explosão do átomo primordial. Gosto de pensar que Lemaître morreu em paz e justificado pelo seu trabalho. Os seus restos mortais repousam no túmulo da família, no antigo cemitério comunal de Marcinelle, em Charleroi, Bélgica.

Quando escrevi isto inicialmente, dominava-me o desejo de visitar o local de repouso final de Georges Lemaître, o pai da teoria do Big Bang. A 1 de julho de 2018, a mulher que agora é minha esposa acompanhou-me numa viagem de três horas desde Essen, na Alemanha, até ao cemitério de Charleroi, para tornar este desejo realidade. Era um dia de calor abrasador e deparámo-nos com um cemitério povoado por milhares de campas, um labirinto de lápides sem qualquer sistema de informação que nos orientasse. Uma porta enferrujada e desbotada era a única entrada para esse mundo de memórias perdidas. Honestamente, não consigo recordar como conseguimos dar com o túmulo de Lemaître naquele mar de sepulturas. Deambulámos de um lado para o outro, lendo cada um dos epitáfios na esperança de encontrar o certo.

De repente, a Nicole exclamou: «Encontrei!», algo que já dissera uma dúzia de vezes antes. Apesar do meu crescente desânimo, aproximei-me, incrédulo. Mas o meu semblante mudou quando finalmente li a inscrição numa pedra em tons brancos e amarelados: «Mgr. Georges Lemaître», seguida do ano da sua morte, 1966. Nesse momento, a minha futura esposa exclamou: «Feliz aniversário!» Sim, tudo aquilo fora uma pequena odisseia para celebrar o meu dia especial. Monsenhor Lemaître descansa num pequeno mausoléu familiar, rodeado por membros da sua linhagem que faleceram antes e depois dele. Aquele instante foi mágico, um encontro íntimo com a história da cosmologia e um presente de aniversário inigualável. Pôr os pés no lugar de repouso do pai da teoria do Big Bang soube a uma espécie de ritual de posse que sempre ansiara realizar.

É justo reconhecer Lemaître como o pai da teoria do Big Bang e dar-lhe o lugar que merece na ciência e na cultura. Na escola, ensinam-nos quem foram Aristóteles, Newton e Einstein, mas poucos sabem que um jesuíta, a partir de um raciocínio simples e extraordinário, mudou a nossa forma de conceber o universo. Graças a ele, com um modelo belíssimo cujo nome devemos a um dos seus mais acérrimos rivais — Fred Hoyle —, os investigadores passaram a encarar como problema científico um universo que teve uma origem e evoluiu no tempo.

Do mesmo modo, é provável que na escola lhe tenham ensinado que a teoria do Big Bang, ou a Grande Explosão, explica a origem do universo. Contudo, essa afirmação é imprecisa. O Big Bang não é uma teoria sobre a origem do universo, é uma teoria sobre a sua evolução: «A teoria não nos diz por que começou, nem como começou o universo; antes indica como evoluiu depois de ter come-

çado». O universo que observamos quando erguemos o olhar pode descrever-se bem com a teoria da relatividade. Ainda assim, quando os cosmólogos recuam no tempo para explicar esse átomo primordial, imensamente pequeno, denso e quente, as equações deixam de fazer sentido e conduzem a um resultado preocupante: infinito.

O que falta para que os cosmólogos possam modelizar e explicar o átomo primordial de Lemaître? É precisa uma teoria que descreva objetos massivos e densos — o que faz a relatividade —, mas incrivelmente pequenos — o que faz a mecânica quântica. Contudo, ambas as teorias são incompatíveis e só funcionam nos respetivos domínios de aplicação. A relatividade fornece uma descrição satisfatória de um universo a grande escala, dominado sobretudo pela gravidade, enquanto a mecânica quântica explica os fenómenos atómicos e subatómicos, a pequeníssima escala do universo.

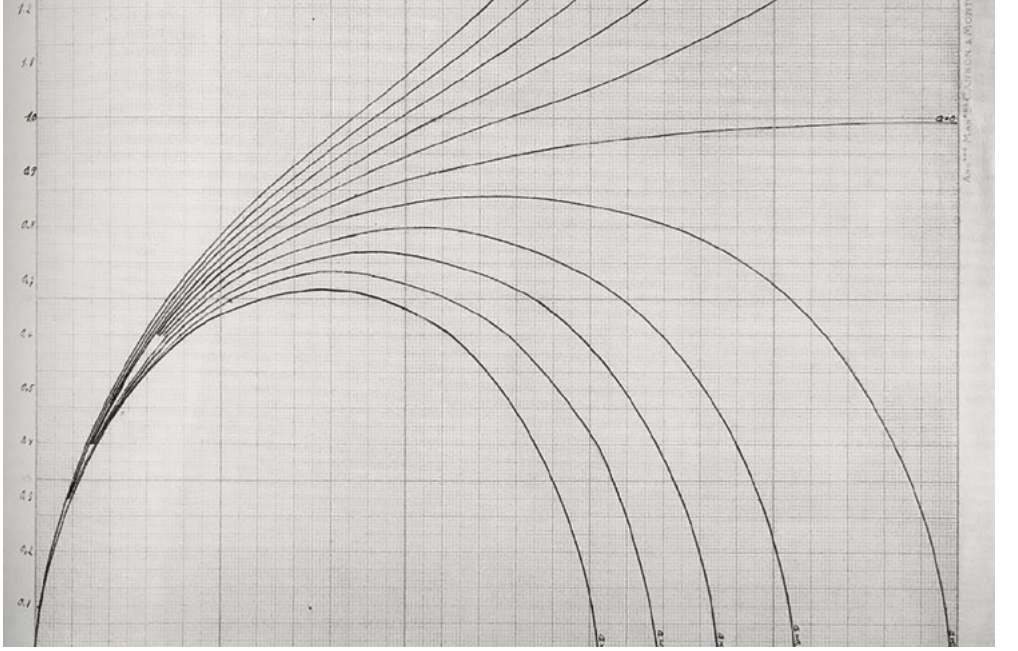
Ambas as teorias saíram vitoriosas nas respetivas provas experimentais e observacionais, a mecânica quântica mais do que qualquer outra. Não obstante, quando os físicos tentam descrever um universo pequeno, quente e denso, as coisas simplesmente não funcionam. Esse ponto onde tudo perde sentido é o que se denomina singularidade. Talvez este termo o remeta para um dos constituintes dos buracos negros e, bem, não está enganado. Acaba de inferir, como fizeram os cosmólogos, que existe uma ligação profunda entre a origem do universo e os buracos negros.

Encontrar uma formulação que consiga fundir as propriedades descritivas de ambas as teorias é o que os cientistas chamam a «Teoria de Tudo» (*Theory of Everything*, *ToE*), ou «Teoria da Grande Unificação» (*Grand Unification Theory*, *GUT*). Este é um desafio que muitos dão como impossível, mas que para outros constitui uma das áreas de investigação mais apaixonantes da física. Adiante exploraremos brevemente alguns dos candidatos ao estatuto de ToE.

Assim, por agora, a teoria do Big Bang apenas nos pode dizer que o tempo, o espaço, a matéria e a energia partiram de um único ponto e têm evoluído desde então. Existem provas disso? Qualquer cosmólogo poderia evocar três evidências observacionais: 1) a expansão do espaço-tempo; 2) a abundância de elementos químicos leves; e 3) a existência da LSS–CMB. Por outro lado, as experiências de física de partículas a altas energias proporcionaram aos físicos um modelo do universo anterior à emissão da LSS, lembra-se? Aquela luz emitida na época da recombinação que funciona como barreira observacional.

Então, sem entrar em detalhes, pensa-se que, há ~13 700 Ma, todo o universo estava contido numa singularidade: um estado imensamente pequeno, denso e quente, indizível pelas leis da física. Por algum motivo, esse ponto expandiu-se e começou a arrefecer paulatinamente. No Tempo de Planck, 10^{-44} s após a grande explosão, o universo era um único campo de energia à Temperatura de Planck, 10^{30} $_0$K. Quando passaram 10^{-34} s, a expansão fez com que a temperatura descesse para

A TEORIA DO BIG BANG APENAS NOS PODE DIZER QUE TEMPO, ESPAÇO, MATÉRIA E ENERGIA PARTIRAM DE UM SÓ PONTO



ARCHIVES LEMAÎTRE AT UNIVERSITÉ DE LOUVAIN

Diagrama manuscrito de Georges Lemaître (c. 1927) que mostra as soluções gerais para a expansão do universo segundo diferentes valores da constante cosmológica.

~10^{27} $_0$K, e levou o universo a uma mudança de fase e a um período de expansão exponencial. Quando este processo terminou, aos 10^{-32} s, a energia condensou-se em matéria e formou uma sopa de partículas elementares: quarks e leptões.

Um segundo depois, quando a temperatura do universo era 10^{10} $_0$K, os quarks perderam energia e, graças à força nuclear forte, puderam constituir aglomerados. O resultado foi um mar fervilhante de nucleões: protões e neutrões, que continuavam acompanhados pelos leptões, o grupo de partículas que inclui o mais conhecido eletrão.

Um minuto depois, a uma temperatura de 10^{9} $_0$K, os protões e os neutrões uniram-se e formaram os primeiros núcleos de elementos químicos leves como o deutério, o hélio e o lítio. Nesse instante, o universo era um plasma ionizado com uma densidade de ~10^{18} cm^3, um espaço-tempo assombrosamente pequeno se o compararmos com o atual.

A partir daí, o universo continuou a expandir-se e a arrefecer lentamente até atingir uma temperatura de 3000 $_0$K e se produzir a recombinação, 380 000 anos após o início da expansão. Desde então, a gravidade começou a fazer o seu trabalho, agregou átomos, formou estrelas e galáxias, e o universo iluminou-se com a luz que nos é familiar. Quando as primeiras estrelas explodiram como supernovas, lançaram para o espaço todos os elementos químicos que se forjaram nos seus núcleos durante milhares de milhões de anos e que hoje dispomos em algo a que chamamos a tabela periódica dos elementos químicos. Alguns elementos pesados, como o azoto, o carbono e o oxigénio, condensaram-se em corpos pequenos, alguns gasosos, como o planeta Júpiter, e outros rochosos, como a Terra.

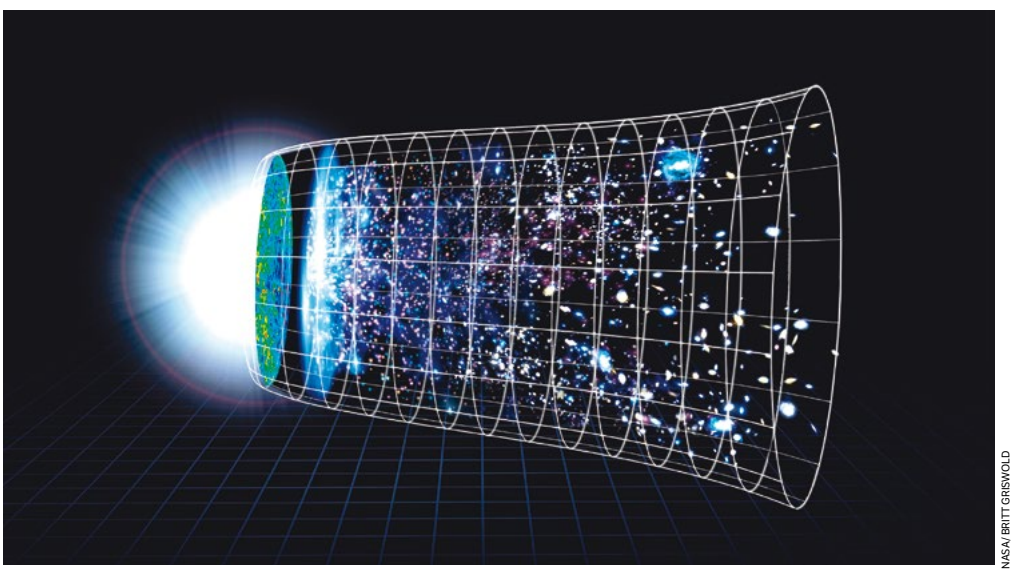
Uma vez arrefecidos o suficiente, estes corpos recém-formados deram início a outro tipo de reações que o universo jamais experimentara: reações químicas. Com o tempo, e a paciência da natureza, este processo deu lugar a moléculas, células e, finalmente, a complexos sistemas biológicos com a capacidade de pensar sobre tudo isto; seres como eu e você, que não se cansam de dirigir o olhar às suas raízes: o espaço.

Atualmente, calcula-se que a densidade do universo é de ~10-6 cm-3, o que indica que, desde o primeiro minuto de existência, o espaço se expandiu 100 milhões de vezes. Se não fosse a expansão do universo, você não estaria a ler isto. Nem os livros nem as pessoas existiriam; não haveria nada, como imaginou Leibniz. A criação de cada estrutura, desde as galáxias e as estrelas até aos planetas e aos livros de divulgação sobre cosmologia, tem estado subordinada a este processo: a expansão do espaço é para a cosmologia o que a evolução é para a biologia.

Porque há algo em vez de nada? Transitoriamente, poderíamos dizer: «porque um ponto diminuto, denso e quente começou a expandir-se». Talvez não seja a resposta clara e detalhada que esperava, mas é o que os cosmólogos têm por agora, e de modo algum entendo que seja uma resposta desprezível. Pelo contrário, é a síntese de um século de ideias e experiências que sustentaram de forma convincente a ideia que um jovem matemático e sacerdote belga propôs um dia: «O universo teve um princípio». Não há uma explicação causal para isso. Nada nos diz o que se expandiu ou porquê. Será a singularidade um ponto em que o nada se converte em algo, ou a evolução de um estado preexistente?

DO NADA PODE SAIR ALGO

Pensar na origem do universo a partir do modelo que acabo de expor implica pôr em causa o princípio aristotélico: do nada, nada sai. A evolução do universo é um processo que cabe na lógica, mas imaginar que algo surge do nada contraria qualquer noção de realidade para qualquer pessoa. Poder-se-ia dizer até que a famosa e bem aceite primeira lei da termodinâmica: «A energia não se cria nem se destrói, só se transforma», sustenta de modo contundente o princípio de Aristóteles. Então, por que confiam os cientistas na teoria do Big Bang?



NASA/BRITT GRISWOLD

Representação visual do crescimento do universo, destacando o Big Bang, a desaceleração pela gravidade e a fase atual de expansão acelerada.

IMAGINAR QUE ALGO SURGE DO NADA CONTRARIA QUALQUER NOÇÃO DE REALIDADE PARA QUALQUER PESSOA

A resposta a esta pergunta reside num ponto que passa despercebido a amadores e, inclusive, a profissionais do tema — constatei-o pessoalmente. Simplesmente, pode dizer-se que quando o físico alemão Rudolf Clausius (1822-1888) enunciou o princípio fundamental da «conservação da energia», nunca pensou na origem do universo. A filosofia desse tempo sustentava que o cosmos sempre existira. Seguramente, se Clausius tivesse conhecido a teoria do Big Bang, teria acrescentado uma nota de rodapé a dizer «isto não se aplica ao universo como um todo».

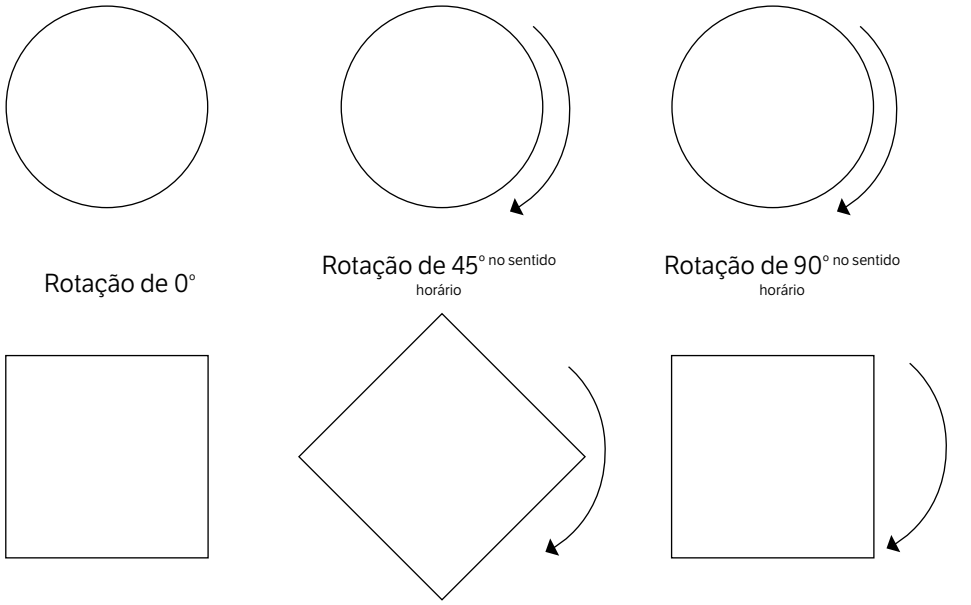
O conceito de energia, tal como o entendia Clausius e como ainda hoje o fazem os cientistas, é problematicamente ambíguo, apesar da convicção de que a primeira lei é verdadeira. Um dos cenários mais representativos deste problema é a perda de energia — o alongamento do comprimento de onda — sofrida pelos fotões como consequência da expansão do universo. Se um fotão é emitido pela sua fonte com uma energia própria dos raios X, por exemplo, e milhões de anos depois é detetado num local distante como uma onda de rádio, para onde vai essa energia do fotão associada ao comprimento de onda? Perde-se ou transforma-se?

Por exemplo, o cosmólogo colombiano Sergio Torres Arzayús, da NASA, partilhou comigo, num seminário sobre cosmologia, que essa energia se converte em trabalho gravitacional. O também cosmólogo espanhol Juan Carlos Bueno tem opinião semelhante. Em outras palavras, a energia converte-se numa fonte que contribui para a expansão do espaço-tempo. Por sua vez, a astrofísica Tamara Davis, da Universidade de Queensland, na Austrália, pensa que existe uma elevada probabilidade de essa energia se perder definitivamente. Que acha você?

Da minha parte, encontrei uma resposta convincente num argumento antigo e pouco conhecido. Emmy Noether (1882-1935), uma das físicas teóricas mais importantes da história, demonstrou há cem anos que as leis da conservação da energia estão relacionadas com as simetrias da natureza, um dos fenómenos mais importantes na física.

Mais adiante aprofundarei um pouco este conceito; por agora, definirei simetria como um traço de um sistema que permanece invariante. Por exemplo, triângulos, quadrados e círculos são objetos simétricos a diferentes ângulos. Um círculo conservará a sua simetria, parecerá igual, independentemente dos graus em que seja rodado. Seria impossível distinguir dois círculos com diferentes ângulos de rotação. Pelo contrário, a simetria de um quadrado é mais limitada, de 90º, pelo que terá de ser rodado 90º, 180º, 270º ou 360º para ser indistinguível do seu estado inicial. Se for rodado 45º, perderá a sua simetria e notaremos a mudança. Estou certo de que, em algum momento, reparou que a mãe andou a arrumar ou que alguém andou a remexer no seu quarto ao ver que os seus objetos pessoais não estavam na posição habitual; a ausência de simetria permite-lhe notar as mudanças.

À semelhança das figuras geométricas, as leis da física encerram simetrias em diferentes graus. Se chocarmos várias vezes duas bolas de bilhar, mantendo as mesmas variáveis, como ângulo e velocidade, entre outras, o resultado será sempre o



As figuras geométricas são um exemplo de simetria. O círculo e o quadrado têm diferentes simetrias de rotação. A simetria do círculo é completa, pelo que parecerá sempre igual, independentemente dos graus em que seja rodado. Por seu turno, o quadrado parecerá igual apenas se for rodado 90º ou algum dos seus múltiplos.

mesmo. Isto é o que os físicos chamam simetria temporal: a passagem do tempo não altera os resultados de uma experiência. Do mesmo modo, as leis da física não dependem do local da experiência — simetria espacial —, nem da direção em que se observe — simetria rotacional.

De forma surpreendente, o teorema de Noether demonstra que sempre que a natureza exibe uma simetria contínua, surge uma lei de conservação associada. A simetria espacial implica a conservação do momento linear, a simetria rotacional, a do momento angular, e a temporal, a conservação da energia. Se a simetria temporal se quebrasse, a energia deixaria de se conservar.

O ponto-chave de todo este assunto é que a maleabilidade do espaço-tempo, descrita pela relatividade geral, implica que o comportamento do universo não é simétrico no tempo; o universo está em constante mudança. Deste modo, a simetria temporal desaparece e a lei da conservação da energia esvai-se. Por outras palavras, o teorema de Noether diz-nos que «sob condições específicas a primeira lei da termodinâmica não se cumpre».

É provável que isto lhe tenha suscitado mais perguntas do que respostas, embora possa dizer-lhe que muitos cosmólogos e físicos teóricos estão na mesma situação. Os problemas da termodinâmica são um aspeto-chave nos modelos cosmológicos e na compreensão da origem e evolução do universo, da flecha do tempo e do destino fatídico do cosmos, entre outros. Posso recomendar três excelentes livros *The Road to Reality* (2009) e *Ciclos de tempo* (2013), ambos do cosmólogo Roger Penrose, e *Decoding Reality* (2010), de Vlatko Vedral, todos úteis para baralhar as ideias e surpreender-se com outras perspetivas a respeito.

Por fim, não posso deixar o tema sem fazer referência a outra pérola termodinâ-

mica: se o nosso universo for infinito, como defendem alguns cosmólogos, conteria uma quantidade infinita de energia. Assim, o universo poderia perder a quantidade de energia que quisesse, pois um valor infinito continuaria a ser infinito. Que pensa você?

OS QUATRO PROBLEMAS DO BIG BANG

A LSS é considerada a assinatura de que a grande explosão que Lemaître imaginou, ou algo semelhante, realmente ocorreu. Mais exatamente, é uma prova de que o universo era um lugar muito mais quente no passado e arrefeceu com o tempo. Contudo, a CMB trouxe também alguns problemas que a teoria do Big Bang tinha de responder: o problema das condições iniciais, o horizonte, a planura e os monopolos.

O problema das condições iniciais é o mais emblemático e controverso. Pode resumir-se como a probabilidade de o nosso universo ter passado à existência e evoluído da forma como o fez; uma probabilidade que os cosmólogos calculam em 1 entre $(10^{10})^{123}$, algo mais ou menos igual a zero. Como se arranjou o universo para transformar uma possibilidade tão baixa num facto real? Fatores como a densidade, a temperatura, a força dos campos primordiais, as massas das partículas, etc., são propriedades que, ao que tudo indica, estão finamente ajustadas. Uma pequena modificação em qualquer delas conduziria à inexistência do universo, ou pelo menos a um universo bem diferente, sem vida, por exemplo. Para que faça uma ideia, o protão pesa 1836 vezes mais do que o eletrão; se pesasse 1835 ou 1837, o universo não seria o que é. Tal é a gravidade e delicadeza da questão!

O problema do horizonte foi proposto por Robert Dicke, o mesmo físico experimental norte-americano que procurou a CMB sem êxito. O cerne desta questão é a homogeneidade da LSS. Existe uma crença fortemente arreigada não apenas na ciência, mas também no quotidiano, que indica que, para que um meio seja homogéneo, os seus constituintes devem estar em contacto ou trocar informação entre si.

Faça a seguinte imagem mental, ou, se preferir, realize a experiência em casa com cuidado para não se queimar. Depois de um duro dia de trabalho, chega a casa com o desejo incessante de tomar um banho reconfortante. Então, abre a torneira da água quente e espera que a banheira se encha completamente. Quando tenta meter-se na água, dá um salto — está demasiado quente! É preciso arrefecê-la. Para o fazer, abre a torneira da água fria situada numa das extremidades da banheira. Se tentar entrar imediatamente na água, voltará a queimar-se, apesar de ter tentado regular a temperatura. É necessário esperar um momento até que as moléculas de água fria entrem em contacto com as moléculas de água quente e homogeneízem a temperatura. Agora sim, pode tomar um banho prazeroso e relaxar um pouco.

A LSS É CONSIDERADA A ASSINATURA DA GRANDE EXPLOSÃO QUE GEORGES LEMAÎTRE IMAGINOU

Esta situação é perfeitamente extrapolável ao universo. Os físicos consideram que passou pouco tempo desde o nascimento do cosmos para que a sua temperatura se tenha homogeneizado quase por completo, como mostra a CMB. Estima-se que existem regiões que, desde o princípio, estiveram tão afastadas entre si que não puderam transmitir informação — através da luz. Por outras palavras, não há maneira de que a informação transportada pelos fotões tenha viajado desde os extremos do universo, atualmente separados por, pelo menos, 70 000 milhões de anos-luz. Importa esclarecer que, num universo infinito no tempo, a luz teria tido um intervalo mais do que suficiente para alcançar regiões que estiveram desconectadas. A evidência que reunimos até ao momento indica que não é esse o caso do nosso universo.

Agora, no dia seguinte, tem uma festa de disfarces no seu local de trabalho. Procura o seu melhor traje... sim, é este, o de Batman. Quando chega assim às instalações da sua empresa, fica desconcertado: todos os trabalhadores envergam o mesmo disfarce, todos vestiram um fato de Batman como o seu! Não consegue entender como isto é possível e começa a formular algumas hipóteses que expliquem a situação. A primeira: «É uma coincidência que os 200 convidados tenham vindo com o mesmo disfarce». Não me parece; é muito improvável que a todos lhes tenha ocorrido a mesma ideia... simplesmente impossível. A segunda: «Em algum lugar da empresa estava estipulado que era preciso vir disfarçado de Batman»; talvez, mas eu trabalho aqui e não vi nenhum cartaz a dar essa instrução... pensarei noutra opção. A terceira: «Todos combinaram vir com o mesmo disfarce». É uma boa resposta, talvez a mais aceitável. Porém, é provável que, apesar de desfrutar da festa, continue com alguma intriga e a perguntar-se por que motivo todos vieram com o mesmo traje.

Porque é que cada uma das regiões do universo se veste com o mesmo traje? Porque é que todo o lugar tem a mesma temperatura? Os cosmólogos consideraram as mesmas possibilidades da festa de disfarces: foi uma casualidade? É possível; não há

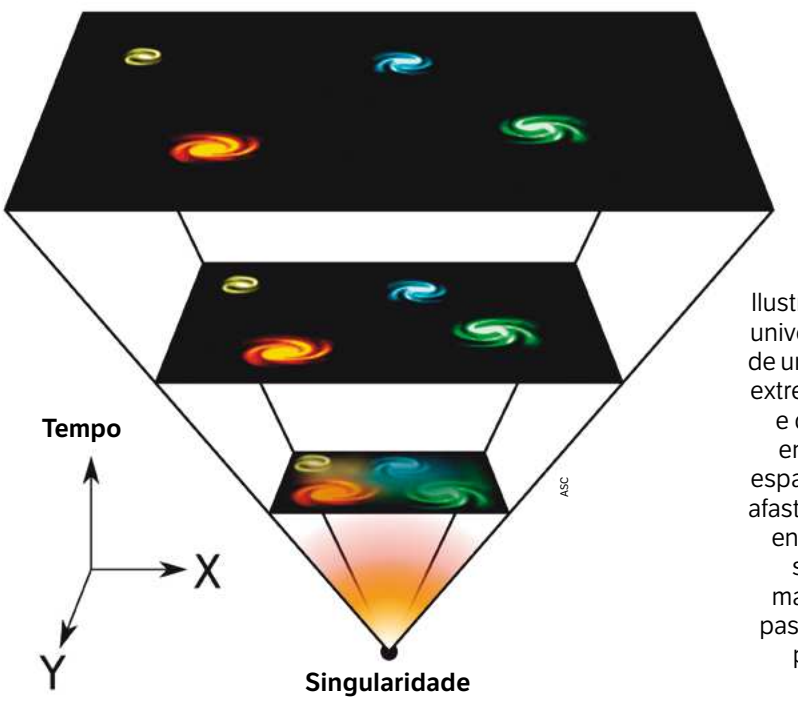


Ilustração de como o universo terá surgido de uma singularidade extremamente densa e quente. Desde então, o próprio espaço expandiu-se, afastando as galáxias entre si, de forma semelhante à maneira como as passas sobem num pão no forno.

EXISTE ALGUMA LEI FÍSICA QUE DITE AS MESMAS PROPRIEDADES A CADA UMA DAS REGIÕES DO COSMOS?

forma de sabê-lo objetivamente, mas muitos são avessos a acreditar que 10_{80} regiões separadas tenham as mesmas propriedades apenas por coincidência. Se já lhe parece surpreendente com apenas 200 pessoas, imagine-o com este número colossal de regiões desconectadas do universo! Segunda opção: existirá alguma lei física que dite as mesmas propriedades a cada uma das regiões do cosmos? É uma ideia mais plausível do que a primeira, mas os cosmólogos não dispõem de qualquer evidência, nem teórica nem experimental, de que tal tenha ocorrido. Terceira opção: poderá o universo ter gerado um mecanismo para transmitir informação entre as diferentes regiões, de modo a homogeneizar a sua temperatura? É possível, e os cosmólogos têm algumas boas razões para o crer. Não tardará muito a encontrá-las.

Em terceiro lugar, o problema da planura pergunta-nos: por que motivo o universo tem uma curvatura próxima ou igual a zero? Os dados obtidos a partir de anos de análise da CMB parecem indicar que o universo possui uma geometria plana. Particularmente, este tipo de geometria requer condições iniciais muito precisas, de pelo menos um entre cem biliões. Por exemplo, calculou-se que, um segundo depois da grande explosão, o universo deveria ter uma densidade de 10_{14} cm^3, e nada diferente disso, para se estabelecer como um ente plano e assim se manter. Um valor menor conduziria a uma expansão descontrolada que impediria a formação de estruturas, enquanto um maior desencadearia o colapso do espaço-tempo em microssegundos. É uma situação análoga à de tentar equilibrar um lápis sobre a ponta e conseguir que se mantenha assim durante 13 700 Ma. Para o lápis não cair, exige-se um ajuste único, para não dizer perfeito, que perdure durante muito tempo. E não se esqueça de que isso se soma à impossibilidade de $(10^{10})^{123}$ de que tudo tivesse arrancado!

Finalmente, o problema dos monopolos foi exposto em 1979 pelo físico teórico John Preskill (1953-), professor no Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech). Trabalhando com modelos matemáticos que descreviam o universo nos seus primeiros instantes, quando as forças e as partículas estavam unificadas, Preskill concluiu que, a temperaturas altíssimas, se deveria formar um número significativo de monopolos: partículas carregadas magneticamente apenas com polos norte ou sul. No entanto, as experiências de física de partículas e as observações astronómicas demonstraram que os polos surgem sempre aos pares, tal como num íman terrestre. Mesmo que parta o íman ao meio, obterá dois ímanes, cada um com um polo norte e um polo sul. Nem os físicos de partículas nem os astrónomos detetaram monopolos em algum lugar do cosmos.

Embora os cosmólogos tenham avançado algumas respostas, a história destes quatro problemas ainda se está a escrever. Contudo, neste momento, só a experimentação nos poderá tirar deste intricado labirinto e até poderá dizer-nos, nos próximos anos, que tudo o que pensávamos saber sobre o universo está errado. Como veremos nos capítulos seguintes, todas as cartas estão sobre a mesa à espera que um juiz determine o vencedor. ■

O universo à rédea solta

De seguida, exploraremos quatro ideias que procuram complementar a teoria do Big Bang nos domínios em que não é aplicável. A maioria existe no mundo abstrato da matemática e é possível que a explicação oferecida por um entusiasta da ciência, no idioma das palavras, não seja suficiente. Reconforta-me, contudo, saber que não o é para nenhum especialista. John Ellis, um dos mais reputados físicos teóricos e investigadores em física de partículas a nível mundial, não conseguiu explicar a dois dos meus colegas da Escola de Astronomia de Cali o que é o «bosão de Higgs» melhor do que eu o farei nesta secção.

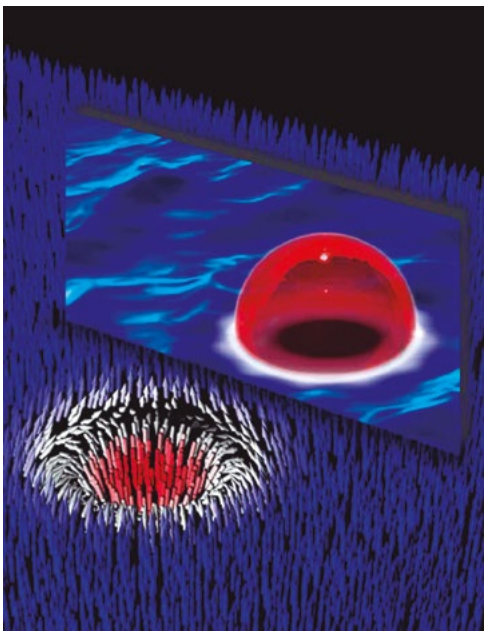
É habitual encontrar na literatura o termo Big Bang padrão (*Standard Big Bang*, *SBB*), também designado universo Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW), que se refere a um universo em expansão, isotrópico e homogéneo que parte de uma singularidade. Este modelo predominou como principal linha teórica da cosmologia até ao início da década de 1980, quando foi alvo de alguns complementos que procuravam responder aos problemas do horizonte, da planura e dos monopolos. Ainda assim, o universo FLRW continua coerente com a maioria das observações astronómicas.

O complemento mais conhecido ao SBB foi proposto no início dos anos 80 por Alan Guth (1947-), um importante cosmólogo e físico de partículas do MIT. Guth é considerado o pai da inflação cósmica, um modelo matemático que altera substancialmente as ideias acerca dos microssegundos que se seguiram à singularidade. A teoria da inflação propõe que 10^{-36} segundos após a grande explosão, o universo se superarrefeceu e sofreu um processo de superexpansão, uma expansão exponencial que aumentou consideravelmente o seu tamanho. Matematicamente, esta proposta é bastante complexa, mas não ao ponto de não podermos analisá-la na sua formulação teórica essencial.

ICTP

Alan Guth, físico do MIT, é um dos principais impulsionadores da teoria da inflação cósmica, chave para entender os primeiros instantes do universo.

A teoria assenta em três conceitos fundamentais: campo escalar, falso vazio e pressão negativa. Existem dois tipos de campos quânticos: os campos escalares e os campos vetoriais, como o eletromagnético. A característica essencial de um campo escalar é possuir apenas uma magnitude em cada ponto do espaço, enquanto os campos vetoriais possuem magnitude e direção. Uma analogia útil pode ser um campo vetorial chamado «velocidade do vento», ao qual se pode medir, sem dificuldade, uma magnitude de 32 km/h e uma direção leste-oeste; enquanto um campo escalar chamado «temperatura» apresentará apenas uma magnitude de 32º. Não faz sentido afirmar que há 32º de temperatura na direção norte.



G L'AMPORESI, A RECATI AND A ZENESINI

Representação experimental de um falso vazio quântico: uma bolha em expansão ilustra a transição para um estado mais estável.

Definirei agora, em paralelo, os dois conceitos restantes — estado de falso vazio e pressão negativa —, que neste caso são interdependentes. Um falso vazio é um estado que contém pressão negativa. É provável que na escola o leitor só tenha ouvido falar de pressão, por exemplo, a força que um gás exerce quando confinado num recipiente. No entanto, há dois tipos de pressão: a positiva, própria dos vazios ordinários que possuem energia gravitacional; e a pressão negativa, característica dos falsos vazios, que produz um efeito antigravitacional. A propriedade essencial de um falso vazio é atuar temporariamente como se fosse o estado de menor energia, outro conceito importante neste primeiro avatar.

O estado de menor energia é a condição para a qual tendem todos os sistemas físicos. Quando lançamos um pião — quem ainda sabe o que é isso... — vemos que gira durante alguns segundos, até chegar ao seu estado de menor energia: pára e tomba. O mesmo sucede quando atiramos uma bola ao ar. Em vez de ficar a flutuar ou continuar a subir, a bola tenta regressar ao seu estado de menor energia: assentar numa superfície. É mais natural e estável para a bola permanecer no chão do que no ar. O leitor mais atento notará sem dificuldade que esta é outra face da gravidade: os corpos caem ao chão porque procuram o seu estado de menor energia!

O ESTADO DE MENOR ENERGIA É A CONDIÇÃO PARA A QUAL TENDEM TODOS OS SISTEMAS FÍSICOS

A INFLAÇÃO ETERNA SUSTENTA QUE A INFLAÇÃO NUNCA CHEGOU AO FIM NOS PRIMEIROS INSTANTES DO UNIVERSO

Usemos agora novamente o veículo da imaginação para compreender a diferença entre um estado de vazio verdadeiro com pressão positiva e um de falso vazio com pressão negativa. Transporte-se até uma paisagem belíssima, onde observa a água caindo da borda de uma montanha — onde possui uma enorme quantidade de energia potencial — para formar uma cascata cristalina que ruge a cada segundo. O seu mapa de viagem indica-lhe que a cascata é o nascimento de um pequeno rio cujo destino final é o mar — o seu estado de menor energia possível. Entusiasmado e desejoso de observar a cascata mais de perto, segue o leito do rio na direção da montanha.

Contudo, após caminhar algum tempo, depara-se com algo que não imaginava. A certa altura do percurso, uma empresa de energia construiu uma barragem que altera o fluir natural do rio. Apesar de a água na beira da barragem parecer calma, até convidativa para um bom mergulho, este estado pouco habitual faz com que os muros da construção estejam sujeitos a uma enorme pressão; a água luta por continuar o seu percurso para chegar ao seu estado de menor energia, o mar. Como estacionar na barragem não é o estado «ideal» para a água, pode dizer-se que os engenheiros deram origem a um estado de falso vazio. A barragem funciona então, temporariamente, como o estado de menor energia para a água, por esta não poder prosseguir o seu fluxo natural.

Algum tempo depois, tem o privilégio de perceber que aquele estado de calma em que a água permanecia na barragem era ilusório. De súbito, observa a parede a abrir fendas, e uma falha de engenharia conduz ao desastre. A pressão contida na barragem liberta toda a energia do falso vazio e a água irrompe com estrondosa força, projetando a grande distância pedaços do muro. Nada mais é do que o esforço de todo o sistema por alcançar o seu verdadeiro estado de menor energia, um vazio verdadeiro. Se esta imagem lhe foi útil e esclarecedora, mantenha-a presente pelo resto do capítulo.

Definidos estes três conceitos, e já de regresso a casa depois da caminhada ecológica, voltemos a Guth e à inflação. A sua teoria indica que 10^{-36} s após a grande explosão, o espaço-tempo estava completamente preenchido pelo inflaton (φ), um campo escalar que continha toda a energia potencial do universo. Nada mais, nenhum outro campo ou partícula existia. Nesse instante, a diminuição da temperatura gerou uma mudança de fase e, por motivos ainda pouco claros, o universo, ou pelo menos uma parte homogénea dele, formou uma espécie de bolha — uma barragem — cheia de pressão negativa. Estima-se que este estado de falso vazio tenha ocorrido num espaço com uma bilionésima parte de um protão, cuja densidade era da escala GUT.

Então, tal como sucedeu com a água na barragem, a energia do falso vazio libertou-se e produziu uma expansão exponencial do universo desde 10^{-36} até 10^{-32} s. Estima-se que esta força antigravitacional permitiu que o universo crescesse pelo menos 50 ordens de magnitude, até atingir um tamanho aproximado ao de uma

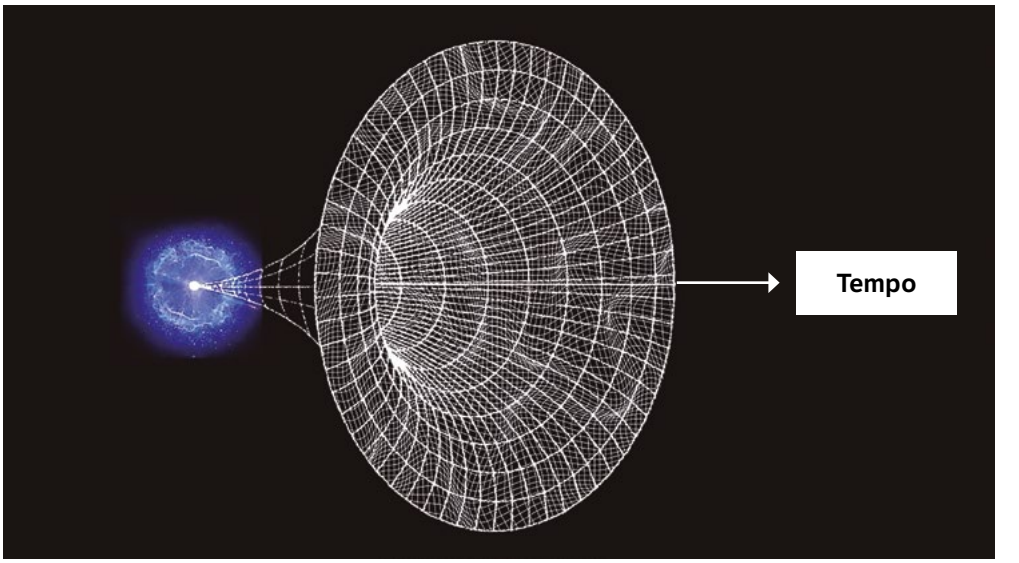
bola de basquetebol, embora alguns modelos inflacionários sustentem que cresceu muito mais. Sei que o tamanho de uma bola pode parecer-lhe pequeno, mas é imensamente grande comparado com o tamanho do universo quando a inflação começou.

Nas primeiras equações da inflação, o estado de falso vazio era o resultado natural de uma mudança de fase que superarrefeceu o universo, então em equilíbrio térmico. Não obstante, embora um estado de falso vazio explicasse o início da expansão, não havia qualquer candidato que explicasse o seu fim.

A primeira proposta de Guth para deter a inflação foi a *Rolling Inflation* (inflação rolante), que estabelecia que a tunelização, um fenómeno extraordinário descrito pela mecânica quântica, era a responsável. Porém, outros cosmólogos notaram que esta solução conduzia inevitavelmente a um universo não homogéneo, o que não era corroborado pelas observações astronómicas.

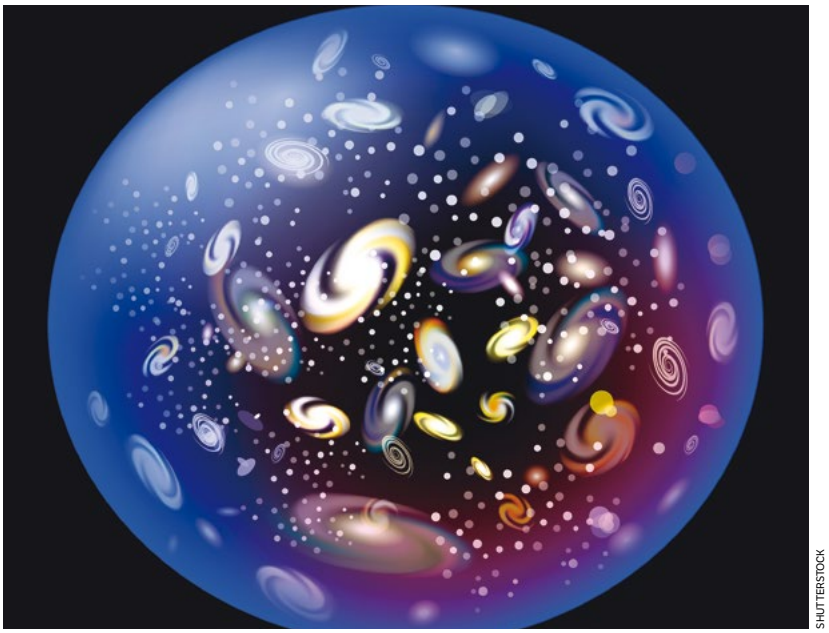
Andreas Albrecht (1957-) é cosmólogo e físico teórico, professor na Universidade da Califórnia. Ao longo da sua carreira, interessou-se por questões fundamentais e ousadas da cosmologia, como o universo primordial, a estrutura cósmica, a energia escura e a variabilidade da velocidade da luz (VSL), chegando a lidar com leis hipotéticas da física anteriores ao universo. Não é difícil imaginar que uma mente como a de Albrecht se tenha interessado por resolver este problema da inflação cósmica de uma forma muito particular.

A sua teoria, a inflação eterna, sustenta que a inflação nunca chegou ao fim nos primeiros instantes do universo, ocorrendo ainda hoje, e jamais terminará. Do seu ponto de vista, no universo primordial ocorreu um processo aleatório que formou bolhas, uma das quais é o nosso universo. Mais tarde, essa bolha superarrefeceu e expandiu-se aceleradamente, tal como propôs Guth. Depois, cada uma das bolhas continuou a originar outras bolhas que criam novos universos e replicam este processo até ao infinito. Surpreendentemente, Albrecht susten-



BIG THINK/ BEN GIBSON

A inflação cósmica descreve uma expansão exponencial do espaço nos seus primeiros instantes, amplificando flutuações quânticas que dariam origem à estrutura do universo.



SHUTTERSTOCK

Imagem que ilustra a expansão do universo através do conceito de «bolha cósmica» ou volume de Hubble.

ta que cada uma das bolhas é um universo que contém leis da física iguais, semelhantes ou diferentes das nossas. Alguns seguem uma evolução FLRW, outros colapsam, esfrangalham-se e outros..., não sabemos o que lhes sucede. Assim, a inflação eterna sugere que a superexpansão proposta por Guth é um subprocesso que pode ocorrer em alguns universos-bolha que flutuam num mar de milhões — e talvez infinitos — universos.

Lamento dizer que, embora isto se torne interessante, não iremos mais além desta vez. Analisar tudo o que decorre deste simples enunciado — aquilo a que a cosmologia atual chama multiversos — levar-me-ia muitas mais páginas e mais tempo do que me posso permitir. Se ficar com um travo amargo na boca, remeto-o para *A Realidade Oculta* (2011), de Brian Greene, para se entreter durante um bom tempo com este paradigma.

Outros cosmólogos garantem que a inflação eterna é um gasto energético desnecessário para o universo e, além disso, que matematicamente é menos provável do que outros modelos inflacionários que põem fim à expansão exponencial, como as formulações baseadas em ruturas de simetria. Por exemplo, o próprio Guth propôs outro tipo de inflação, a *Slow-roll Inflation* que, ao contrário da sua primeira ideia, concebe que o φ, pode libertar toda a sua energia potencial até alcançar o seu estado de menor energia, detendo assim a expansão exponencial.

Em dezembro de 2013, uma experiência corriqueira deu-me a imagem mental mais clara que até agora tive da *Slow-roll Inflation*. Na pastelaria onde vendem o melhor pão de creme da minha cidade, uma das moedas do pagamento caiu de canto ao chão e rolou durante mais tempo do que qualquer outra moeda que tenha visto na vida, até cair sobre uma das faces. Sei que não é nada surpreendente, mas uma analogia com um campo escalar instável como o inflaton pode tornar este fac-

to mais significativo. Que uma moeda caia de canto é possível mas pouco provável. Se o desejar, pode fazer a experiência em casa: deixe cair 20 vezes uma moeda ao chão e conte quantas vezes cai de canto. Formulo a hipótese de que será uma vez, ou nenhuma. Isto é apenas um pequeno exemplo de que é mais provável que um sistema assente no seu estado de menor energia — um estado estável — em vez de num estado instável, que, no caso da moeda, seria permanecer imóvel sobre uma das faces.

Por outro lado, se a moeda cai de canto — um estado instável, com elevada energia potencial — lutará por chegar ao seu estado de menor energia — recorde a cascata. Umas vezes demorará mais a cair, outras menos, mas o certo é que não pode durar nesse estado durante demasiado tempo, ou pode? Lembre-se do filme *A Origem* (2010) — *Inception*, no título original —, protagonizado por Leonardo DiCaprio. Se não o viu, não pode passar mais um dia sem o fazer. Entre viagens contínuas entre a realidade e os sonhos, os protagonistas tinham um tótem, um objeto que lhes indicava se estavam num sonho ou no mundo real. Se o tótem se mantinha num estado instável, por exemplo, a girar indefinidamente, sabiam que se encontravam a sonhar. Recorda-se? Acredita que o tótem no final do filme cai ou permanece a girar pela eternidade? Nos seus próprios sonhos o leitor pode encontrar-se num estado instável, a flutuar, por exemplo. É hora de acordar!

Se o campo do inflaton permanecer a rolar para sempre — como uma moeda — estaremos perante uma inflação eterna; mas se em algum momento cair sobre uma das faces, a inflação pára. É uma imagem simplificada, claro está; a matemática é bastante complexa e digna de cosmólogos como Alan Guth. Embora os teóricos da inflação reconheçam as dificuldades de encontrar um fim para a inflação nos primeiros instantes do universo, muitos consideram mais plausível prosseguir nessa busca do que render-se à inflação eterna. Por seu lado, os adeptos de Albrecht têm o seu próprio problema: encontrar um mecanismo que dê origem à matéria — algo que os seguidores da *Slow-roll Inflation* têm resolvido, pelo menos no papel.

Sem ser um cosmólogo como Albrecht ou Guth, a minha pequena intuição científica e a minha filosofia do mundo levam-me a inclinar por uma inflação que se deteve. Se no futuro a experimentação ou a observação sustentarem esta ideia, ficarei reconfortado; se não, que importa! Afinal, o universo é mais estranho do que consigo imaginar.

A INFLAÇÃO CÓSMICA E O SUPERARREFECIMENTO

Nos anos que se seguiram à ideia de Guth, pensou-se que a inflação era uma pequena modificação ao SBB, uma teoria que propunha um estado de expansão acelerada não considerado anteriormente. Porém, os cosmólogos não tardaram a aperceber-se das profundas consequências acarretadas por este processo.

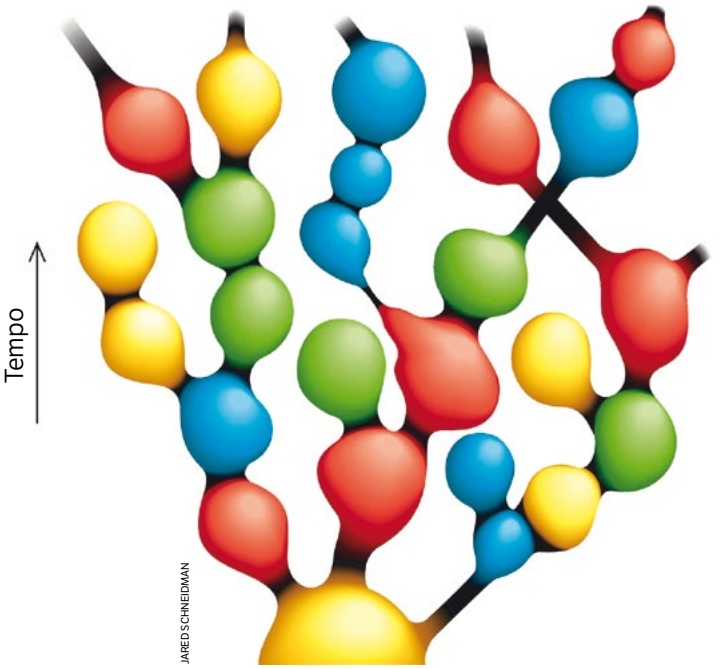
SE O CAMPO DO INFLATON PERMANECER A ROLAR PARA SEMPRE ESTAREMOS PERANTE UMA INFLAÇÃO ETERNA

Em primeiro lugar, pode dizer-se que a inflação oferece uma visão mais natural — embora, naturalmente, não totalmente completa — da evolução do universo, em comparação com o SBB. Se se incorporar um período de superexpansão anterior à evolução FLRW, as condições iniciais decorrem do próprio mecanismo da inflação e não têm de ser colocadas *ad hoc* nas equações.

Em segundo lugar, recorde o problema da singularidade e a sua relação com a lei da conservação da energia. Se a um cosmólogo da inflação perguntarem: de onde proveio a energia do universo? Provavelmente responderá: «a energia do universo provém do campo gravitacional». A gravidade tem uma propriedade especial: o seu campo pode tornar-se negativo sem qualquer limite, em troca da geração de energia positiva. Portanto, quando se subtrai a energia negativa do universo — representada pela gravidade — à energia positiva — representada pela matéria e pela radiação —, a energia total é um valor muito pequeno, podendo mesmo ser zero. Em outras palavras, o campo gravitacional permite que o universo se crie a partir do nada, "tomando emprestada" energia de alguma forma. Então, a gravidade preexiste ao universo? Tema complicado; para formar uma ideia mais clara pode consultar o *best-seller* de Stephen Hawking e Leonard Mlodinow, *O Grande Desígnio* (2010).

O que antecede remete-nos também para o problema da incompatibilidade entre a teoria gravitacional — a relatividade — e a teoria quântica, sugerindo fortemente que uma melhor compreensão do universo primordial terá de assentar numa melhor compreensão da gravidade, isto é, numa teoria quântica da gravidade. Nestes termos, o fenómeno mais comum da experiência humana pode ocultar o maior mistério da existência.

Por outro lado, a inflação fornece também uma resposta ao problema do horizonte, postulando que o universo que observamos, estranhamente homogéneo, esteve de facto em contacto causal em algum momento — lembra-se daquela terceira opção em que todos combinaram ir à festa com a mesma fantasia? Antes de

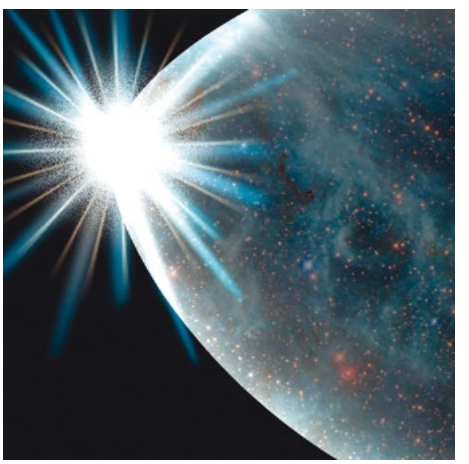


O modelo de inflação eterna. Os universos que apresentam inflação reproduzem-se por toda a eternidade. Cada novo processo inflacionário constitui outros universos-bolha que podem possuir leis da física iguais ou distintas do nosso.

UMA HIPEREXPANSÃO TEM A FACULDADE DE APAGAR QUALQUER RUGA OU FORMA, ATÉ TORNAR O ESPAÇO-TEMPO PLANO

começar a expansão exponencial, todo o universo observável estava contido numa bolha tão pequena que todos os seus pontos tiveram tempo suficiente para homogeneizar a sua densidade e temperatura. Assim, o que observamos através dos nossos telescópios não é senão uma ampliação, produzida por um falso vazio, de um pequeníssimo ponto primordial.

Mais ou menos o mesmo raciocínio aplica-se para responder ao problema da planura. Em vez de assumir a existência de condições iniciais — especialmente de densidade — que favoreçam uma geometria plana, a inflação postula que o espaço-tempo se expandiu por um fator de pelo menos e^{60}. Deste modo, é fácil argumentar que, independentemente da sua geometria primordial, uma hiperexpansão tem a faculdade de alisar qualquer ruga ou forma, até tornar o espaço-tempo basicamente plano, com um raio de curvatura próximo de zero ou $\Omega k \sim 10^{-5}$. Em outras palavras, pode dizer-se que esta expansão descomunal fez com que k (a curvatura do espaço) dominasse p (a densidade da massa) na equação de Friedmann, dando como resultado a densidade crítica.



MIT

Cientistas simulam o reaquecimento cósmico, a fase-chave que ligou a inflação à origem do Big Bang.

Adicionalmente, a existência de um campo escalar que condense toda a energia potencial do universo evita que a matéria passe por temperaturas tão elevadas como para produzir monopolos. A questão é que, no SBB, a matéria existiu desde o princípio, desde a singularidade, e por isso esteve sujeita às altas temperaturas GUT que produzem monopolos. Por seu turno, a inflação postula que a essas temperaturas o universo era dominado por campos escalares como φ, e só quando terminou a hiperexpansão — quando o universo estava suficientemente frio para não produzir monopolos — é que a energia se condensou em matéria. Então, a razão por que não foram detetados monopolos é porque nunca se formaram. Mesmo que se assuma que se formaram monopolos, como sustentam alguns teóricos, estes devem estar tão diluídos pela expansão que encontrá-los seria uma tarefa quase impossível.

Como se não bastasse, a teoria de Guth explica também a existência das anisotropias no CMB a partir das propriedades dos campos escalares. A inflação dá-nos a saber que φ esteve sujeito às flutuações quânticas aleatórias de que todos os campos quânticos padecem. Deste modo, embora o campo do inflaton tenha uma magnitude em todo o espaço — recorde quando falámos da temperatura —, está

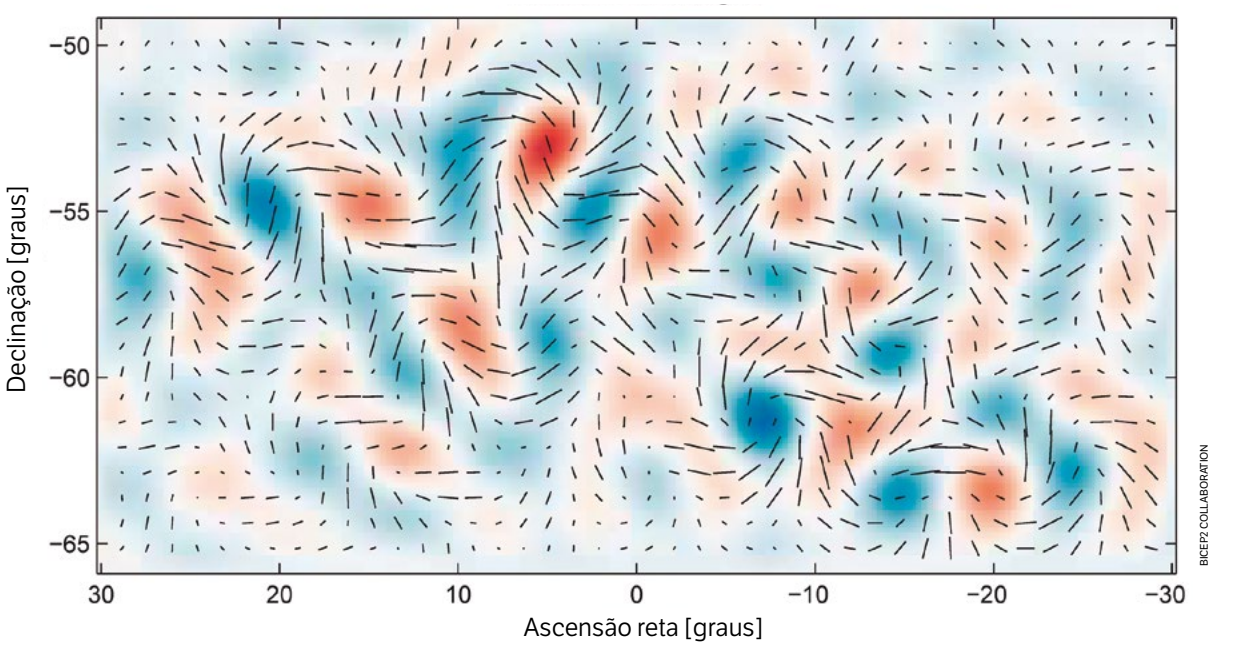
necessariamente subordinado ao Princípio da Incerteza de Heisenberg, que ocasiona flutuações quânticas e, portanto, temperaturas ligeiramente diferentes em pontos distintos.

O que antecede significa que as anisotropias observadas no CMB são, na realidade, flutuações próprias da natureza que foram ampliadas pela expansão e constituíram as sementes que permitiram os colapsos gravitacionais que deram origem à formação de grandes estruturas. Se essas flutuações quânticas não tivessem ocorrido, provavelmente o gás estaria distribuído por todo o espaço de forma tão homogénea que não se teriam formado estrelas nem galáxias.

Há alguns anos, o mundo recebeu uma notícia surpreendente. Na manhã de terça-feira, 17 de março de 2014, o meu pai aproximou-se de mim, segurando o eterno rádio a pilhas que ouve todas as manhãs desde que tenho memória. Quando o encostou ao meu ouvido, ouvi um jornalista dizer: «Um grupo de cientistas norte-americanos no Polo Sul descobriu as ondas gravitacionais geradas após o Big Bang. A comunidade científica está a pedir o Prémio Nobel». Embora tenha a plena certeza de que essa pessoa não fazia a mais pequena ideia do que estava a noticiar, pode muito bem ter sido a notícia mais importante que Alan Guth ouviu em toda a sua vida.

«Space Ripples Reveal Big Bang's Smoking Gun», no *New York Times*, e «A big-bang theory gets a big boost: Evidence that vast cosmos was created in split second», no *Washington Post*, poderiam ter sido as manchetes jornalísticas mais importantes de toda a história da ciência, superando a de 21 de maio de 1965, «Signals imply Big Bang universe», que dava conta da descoberta do CMB por Penzias e Wilson, nos Estados Unidos.

Sinal em modo B do *BICEP2*



Mapa de polarização (modo B) captado pelo BICEP2 no Polo Sul. O que se pensou ser o fundo de ondas gravitacionais do Big Bang acabou por se revelar ser o produto do gás da Via Láctea.

AS ANISOTROPIAS OBSERVADAS NO CMB SÃO, NA REALIDADE, FLUTUAÇÕES PRÓPRIAS DA NATUREZA

Para desilusão de muitos, acabou por se descobrir que a equipa dirigida por John M. Kovac, do Centro Smithsonian para a Astrofísica da Universidade de Harvard, não conseguiu encontrar suporte experimental para a teoria proposta por Alan Guth. Após uma série de controlos rigorosos, revelou-se que o padrão de polarização detetado pelo instrumento Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization (*BICEP2*) era, de facto, produto do gás da Via Láctea e não das ondas gravitacionais geradas imediatamente após a inflação, durante a fase de reaquecimento.

Numa pressa motivada pelo receio de serem ultrapassados por outros investigadores na publicação de observações deste tipo, a equipa de Kovac precipitou as análises, baseando-se em dados preliminares e insuficientemente validados sobre os níveis de gás na Via Láctea, detetados pelo satélite *Planck*. Este erro, excecional na sua magnitude, foi um duro golpe para a equipa. Brian Keating, um dos cientistas envolvidos no projeto, aprofunda este revés no seu livro *Losing the Nobel Prize* (2018). Nele, Keating narra em detalhe o ansiado descobrimento das polarizações B, bem como o erro crucial que marcaria o destino do projeto de Kovac. Não só nos oferece uma visão da ciência em ação, como também nos recorda que, mesmo na busca das verdades mais transcendentes, somos humanos e estamos sujeitos ao erro. Se tivesse sido real, este registo constituir-se-ia na mais antiga fonte de informação da história do universo que o modelo cosmológico atual permite conceber. Seria a prova mesma da existência de pequenas vibrações do espaço-tempo ocorridas no momento em que a energia contida no campo do inflaton se converteu em matéria.

No momento em que escrevo estas linhas, passaram pouco mais de 40 anos desde que Guth publicou o seu artigo «Inflationary universe: a possible solution to the horizon and flatness problems» (1981), texto que muitos cosmólogos viram como uma esperança para resolver alguns problemas do SBB. Sem dúvida, esta teoria desempenhou um papel fundamental na cosmologia das últimas décadas e oferece ideias coerentes com as observações astronómicas. Não obstante, embora a teoria tenha sobrevivido a diversos escrutínios e apresente previsões importantes, subsistem ainda muitas questões em aberto. Qual foi o processo que pôs fim à inflação? O que aconteceu antes de 10^{-36} s? Que mecanismos podem dar origem a uma expansão exponencial?

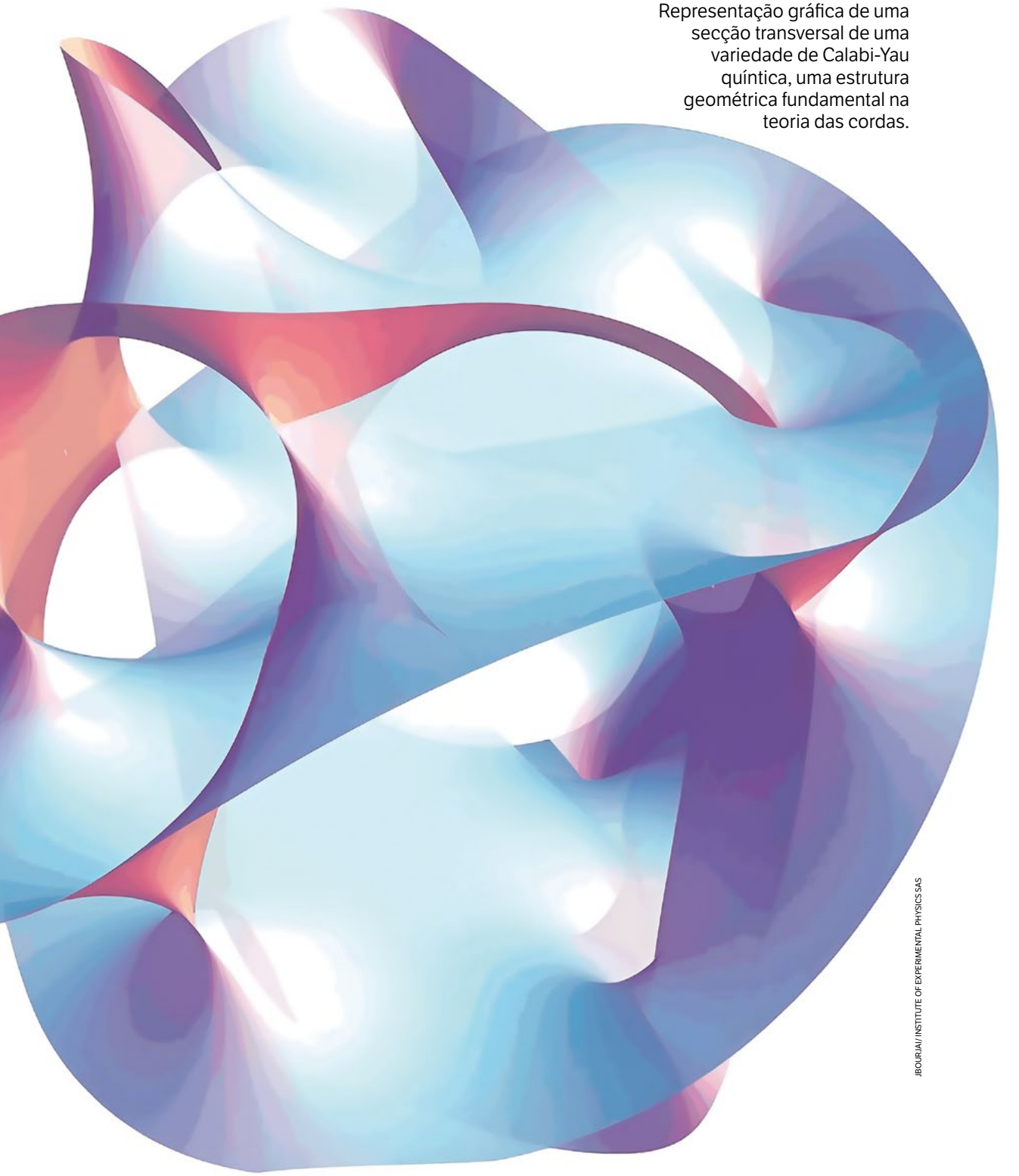
Por seu lado, a compreensão de campos escalares como o inflaton pode ser um suporte fundamental para determinar a natureza da energia escura, que abordaremos no último avatar. Ao postular que o universo observável era uma pequena região do espaço que esteve em contacto causal, os teóricos da inflação assumem que outras regiões do espaço foram arremessadas muito para além do horizonte observável, isto é, fora do nosso alcance prático. Serão essas regiões uma realidade? Poderemos alguma vez saber algo sobre elas? A resposta a todas estas incógnitas está nas mãos de pessoas como o leitor, como eu. ■

UM PEQUENO APERITIVO:

cosmologias quânticas

Brian Greene (1963-) é um cosmólogo norte-americano e um dos mestres da divulgação científica no mundo. Devo dizer que a pessoas como ele devo a minha paixão por este campo, e não foram poucas as reflexões, dores de cabeça e surpresas que o professor Greene me proporcionou. No seu último livro, *A Realidade Oculta* (2011), condensa grande parte das ideias que vem desenvolvendo desde 1999, quando publicou a sua obra mais célebre, *O Universo Elegante*, que conta também com um excelente documentário homónimo em três episódios. A especialidade deste físico é a teoria das cordas, uma formulação matemática assente na mecânica quântica que tem muito a dizer sobre o nosso universo — talvez até demais!

Conceber uma alternativa ao ponto matemático com densidade, curvatura e temperatura infinitas — a singularidade — é algo em que teóricos como Brian Greene se concentram. Precisaremos de conceber um novo princípio, outras leis da física para entender o universo primordial? É precisamente a isso que a cosmologia quântica procura responder.



Representação gráfica de uma secção transversal de uma variedade de Calabi-Yau quíntica, uma estrutura geométrica fundamental na teoria das cordas.

JBOURJAI/ INSTITUTE OF EXPERIMENTAL PHYSICS SAS

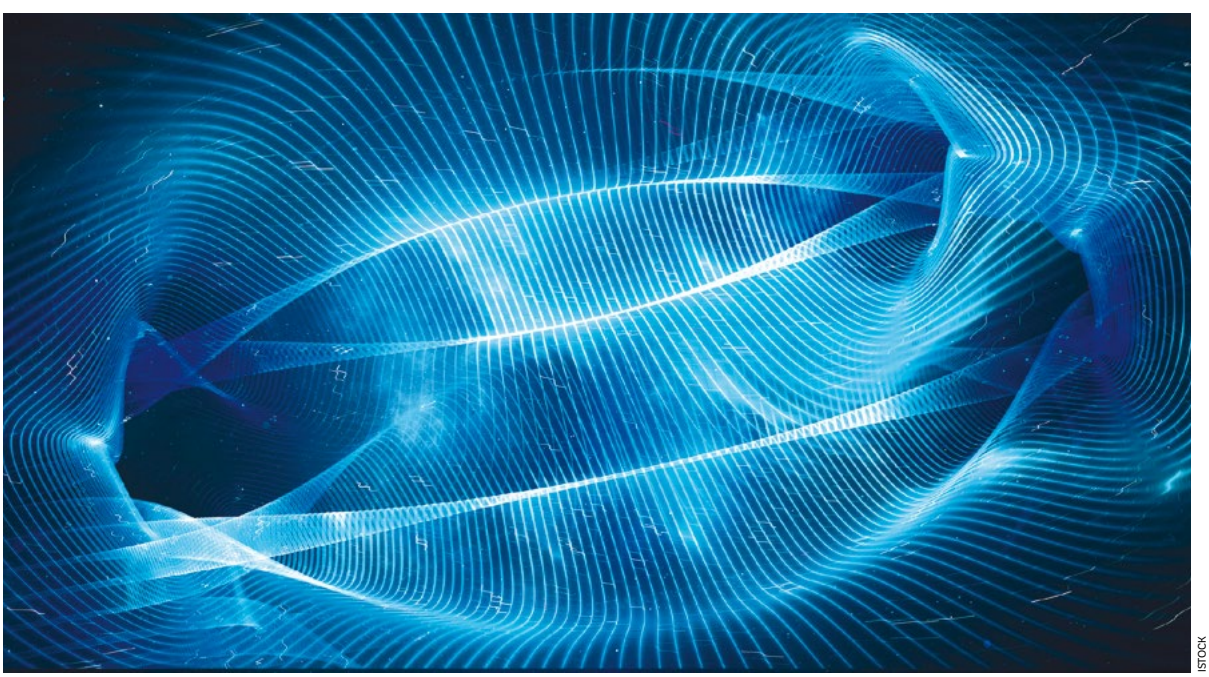
AS NOTAS DA HARMONIA DOS MUNDOS

Uma das abordagens mais destacadas da cosmologia quântica tem por base a teoria das cordas. A principal característica destes modelos é que propõem uma modificação revolucionária da relatividade e do Modelo Padrão da física de partículas, as duas teorias mais importantes e comprovadas da ciência.

A génese da teoria das cordas remonta aos anos sessenta do século passado, quando jovens físicos teóricos como Leonard Susskind (1940-) procuravam soluções matemáticas que pudessem explicar diversos fenómenos da física de partículas. Na sua primeira versão, a teoria propunha uma descrição alternativa para os hadrões, partículas constituídas por quarks e antiquarks e que respondem à força nuclear forte.

A corrente tradicional da física aceita que os quarks são partículas elementares pontuais, isto é, pontos em todo o sentido da palavra — não possuem dimensões. No entanto, movido pela necessidade de enfrentar alguns problemas matemáticos que daí decorriam, Susskind propôs, na década de 1960, que os quarks não eram pontos, mas sim objetos unidimensionais vibrantes: cordas com o comprimento de Planck, 10^{-35} m. Posteriormente, desta ideia derivou outra ainda mais surpreendente: «o jardim zoológico de partículas elementares que então se estava a descobrir não passaria de diferentes modos de vibração das cordas».

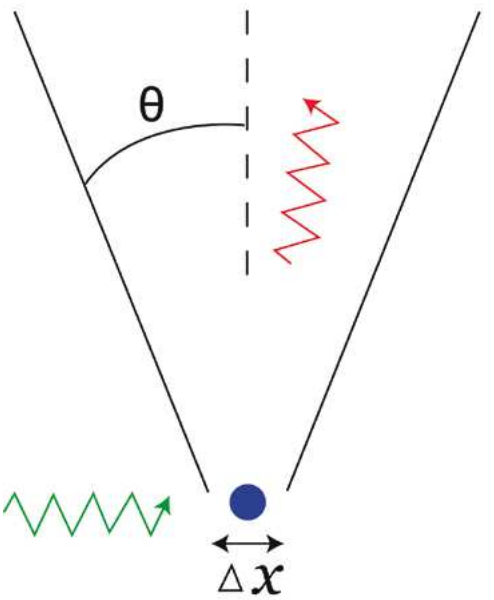
Depois de algumas discussões, telefonemas e apresentações em congressos, a ideia acabou por ser posta de lado; era mais cómodo continuar com o modelo predominante da física de partículas, cujas previsões se iam confirmando ano após ano, do que abraçar uma mudança tão radical como a sugerida por jovens físicos como Susskind. Além disso, enquanto os físicos ortodoxos previam partículas em



ISTOCK

Representação de túneis e entrelaçamento no espaço-tempo, onde a informação flui através de padrões de interferência e campos de probabilidade.

GeV que podiam ser descobertas nos aceleradores de partículas, os teóricos das cordas trabalhavam com a escala do comprimento de Planck, inalcançável pela experimentação — ainda hoje. Foi assim que a Eletrodinâmica Quântica (*Quantum Electrodynamics*, *QED*) e, depois, a Cromodinâmica Quântica (*Quantum Chromodynamics*, *QCD*) prevaleceram como as teorias de referência da física de partículas.



ASC

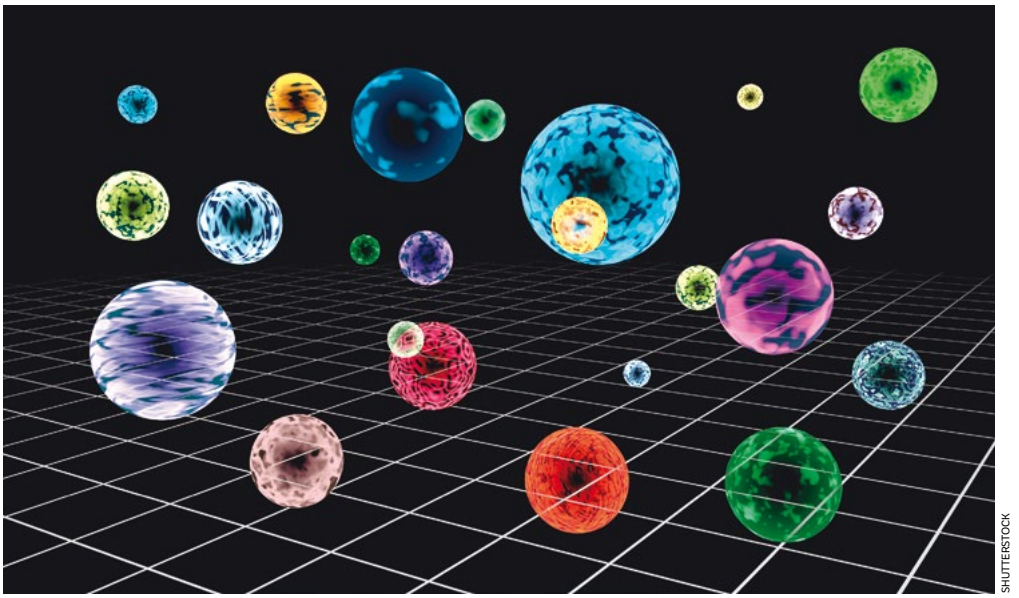
Princípio da Incerteza de Heisenberg: quanto mais se tenta precisar a posição (Δx), menos se conhece o seu momento.

Contudo, acabou por ocorrer um milagre aguardado durante décadas. Em 1979, os físicos norte-americanos Sheldon Lee Glashow (1932-) e Steven Weinberg (1933-2021), e o paquistanês Abdus Salam (1926-1996), foram galardoados com o Prémio Nobel da Física «pelas suas contribuições para a teoria da interação fraca e eletromagnética unificada entre partículas elementares, incluindo, entre outras coisas, a previsão da corrente neutra fraca». Nessa ocasião, conseguiu-se uma formulação matemática que unificava duas das quatro forças naturais hoje conhecidas; um desenvolvimento extraordinário que alimentou a esperança de que, em algum momento, se poderia alcançar o sonho de Einstein.

Nesse momento, quando os físicos acreditavam ter o sonho de uma teoria final ao alcance do lápis, a teoria de Susskind regressou das profundezas para lhes estender a mão. As cordas voltaram ao panorama da física, não para explicar os hadrões, mas com a ambição de explicar tudo. A sua missão mais difícil: unificar a gravidade com o eletromagnetismo, a força nuclear fraca e a força nuclear forte; a tarefa espinhosa de chegar a compreender a singularidade, o ponto que deu origem ao universo.

Falemos agora um pouco das cordas. Estas estruturas unidimensionais hipotéticas estão sujeitas ao Princípio da Incerteza de Heisenberg, que impede que possam ser menores do que 10^{-35} m. É uma forma eficaz de estabelecer limites para grandezas que, noutros enquadramentos teóricos, poderiam crescer ou diminuir sem controlo. Por exemplo, a teoria das cordas desenvolvida por Greene estima que, se rebobinarmos o filme do universo, chegaremos a um ponto em que o espaço-tempo pode atingir um limite mínimo de curvatura, temperatura e densidade,

A GÉNESE DA TEORIA DAS CORDAS REMONTA AOS ANOS SESSENTA DO SÉCULO PASSADO



SHUTTERSTOCK

Uma representação da hipótese dos universos paralelos. Cada esfera simboliza um «universo-bolha» com as suas próprias leis físicas.

contornando assim a singularidade. Mas, claro, nem tudo é um mar de rosas, e uma formulação desta índole gera outras perguntas.

Estima-se, em termos gerais, que o tamanho de uma corda oscile entre 10^{-35} m e 10^{-25} m. Além disso, possuem um momento angular característico e, por não adquirirem massa, ajustam-se às características dos bosões. Estima-se também que possam existir cordas fechadas, em laço, que viajam sem grandes restrições pelo espaço e por outras dimensões; e cordas abertas, cujo movimento se limita a certas dimensões, uma vez que as suas duas extremidades a elas se prendem.

Este enquadramento representa uma mudança conceptual significativa face às teorias atuais da física de partículas. Contudo, o que torna a teoria das cordas uma ideia simultaneamente incompreensível e complexa, e até repudiada por muitos, reside nas suas exigências dimensionais. Para que as cordas possam reproduzir de forma coerente as características do nosso universo, tal como o percebemos, precisam de vibrar em não menos de sete dimensões adicionais às quatro de espaço-tempo com que estamos familiarizados. Este salto quântico na conceção do espaço-tempo, de quatro para onze dimensões, costuma gerar resistência, mesmo entre quem domina a física teórica.

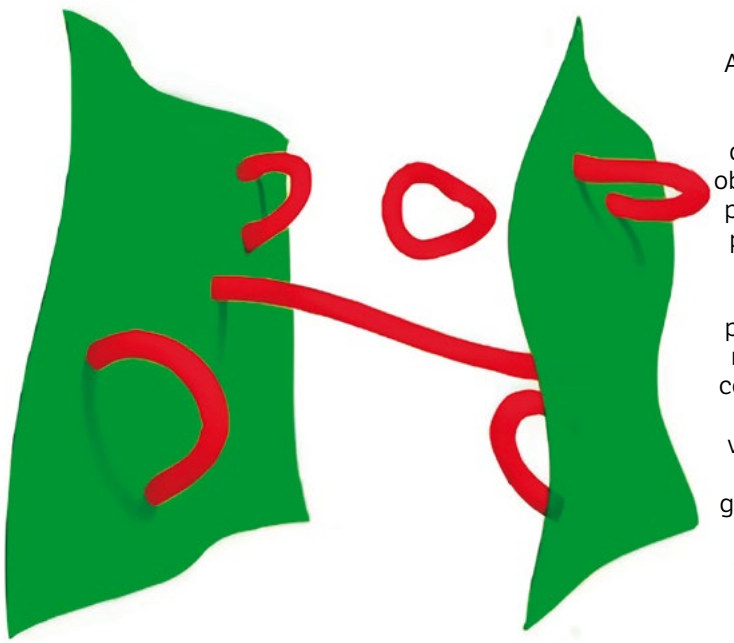
Embora falar de dimensões adicionais soe estranho para a maioria das pessoas, os cosmólogos que tentam desenvolver teorias unificadas jogam com isso com grande frequência. De facto, desde a primeira metade do século XX,

A TEORIA DAS CORDAS FAZ PREVISÕES SOBRE A EXISTÊNCIA DE PARTÍCULAS ELEMENTARES AINDA NÃO DESCOBERTAS

a teoria de Kaluza-Klein incorporou uma quinta dimensão para explicar a luz. Na altura, isto foi considerado um artifício matemático interessante, mas, tal como a geometria de superfícies não euclidianas serviu de pilar à relatividade, a física de dimensões adicionais poderá ser a base da física e da cosmologia do futuro.

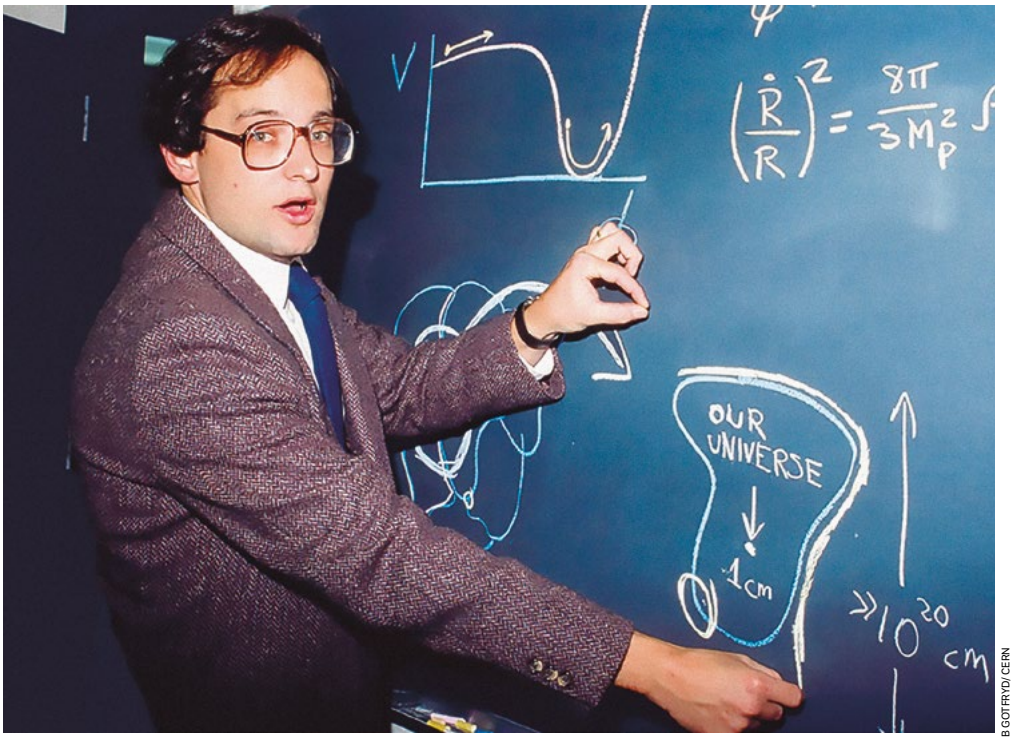
A maioria dos teóricos das cordas concorda que devem existir outras seis dimensões de espaço fortemente enroladas e uma dimensão gigantesca — a décima primeira — que poderá ser interpretada como aquilo a que os cosmólogos chamam hiperespaço. Por outro lado, os cálculos parecem indicar que as propriedades das cordas podem configurar características físicas do universo, como as constantes, a massa das partículas e o alcance e a natureza das forças, etc. Embora hoje estas propriedades pareçam aleatórias mas, ao mesmo tempo, extremamente afinadas, a versão final da teoria poderá revelar a sua verdadeira natureza. Por exemplo, os teóricos das cordas sugeriram que as constantes da Natureza se ajustam dinamicamente à medida que o universo evolui, graças à existência de outro campo, o dilaton. É outra forma de dizer que as constantes da Natureza poderão não ser, na realidade, assim tão constantes.

Por fim, a teoria das cordas faz previsões sobre a existência de partículas elementares ainda não descobertas. Em particular, contém de forma natural um bosão fundamental para a física, o gravitão, o mediador da gravidade. Os cálculos indicam que é uma corda em laço com spin 2, razão pela qual não está ligado às nossas três dimensões do espaço, podendo passear-se pelas dimensões adicionais a seu bel-prazer e dissipar-se a escalas diminutas. Do mesmo modo, postula-se a existência de partículas supersimétricas, primas das já conhecidas, mas muito mais pesadas. Acrescente a terminação «ino» aos nomes dos bosões e talvez acerte em alguns deles: gravitino, fotino, neutralino, etc.; e um «s» aos férmions para obter sleptões e squarks.



DAVID TONG/ STELIARD JENSEN

As cordas vibrantes. Os teóricos da teoria das cordas estimam que diferentes tipos destes objetos são responsáveis pelas propriedades das partículas elementares conhecidas. Existem algumas cordas que permanecem presas ao nosso universo-brana, como os eletrões, outras que podem escapar e viajar entre os distintos universos, como o gravitão, e outras cordas que poderiam estar conectadas a duas ou mais branas.



B GOTFRYD/ CERN

Paul Steinhardt na Universidade da Pensilvânia (outubro de 1983). Steinhardt era então um dos arquitetos-chave da teoria da inflação cósmica.

O que antecede é um resumo elementar, demasiado simples, da teoria mais complexa da ciência atual, cujo único objetivo é ilustrar alguns pontos fundamentais. Não sou a pessoa indicada para lhe apresentar um enquadramento mais formal sobre este tema, mas, se for do seu interesse, posso sugerir que se remeta a *O Universo Elegante* (2002), de Brian Greene, que seguramente lhe será muito mais instrutivo, como o foi para mim.

A secção não termina aqui. Sei que está à espera do discurso que a teoria das cordas oferece sobre a origem do universo; não me esqueci disso. A ideia principal deste enquadramento denomina-se modelo ekpirótico e foi proposta pelos teóricos das cordas Paul Steinhardt, da Universidade de Princeton, Burt Ovrut, da Universidade da Pensilvânia, e Neil Turok, da Universidade de Cambridge.

Em traços gerais, estes cientistas sugerem que existe um hiperespaço povoado por D-branas, gigantescas lâminas tridimensionais, e que o nosso universo é apenas uma delas. No hiperespaço, as branas exercem forças atrativas entre si que as levam a colidir continuamente — num sentido cosmológico. A cada um destes acontecimentos, a energia das branas em colisão redistribui-se e dá origem a processos físicos dinâmicos que criam universos. Depois do embate, as branas recuam, afastam-se e iniciam um processo de expansão desacelerada, enquanto a matéria se agrega em estruturas. Posteriormente, à medida que as D-branas se separam, a força atrativa entre elas volta a aproximá-las. Nova colisão — e recomeçamos.

Deste modo, o universo poderá ser produto de uma megalítica colisão entre

branas, que convertem a sua energia cinética em matéria e radiação. Tal como fazem algumas soluções da inflação, o modelo ekpirótico da teoria das cordas oferece outra forma de conceber um multiverso ou um mundo de universos paralelos. Adicionalmente, propõe um hiperespaço que preexiste ao nosso próprio universo. Qual é a origem e a história dessas branas acidentadas? É uma pergunta em aberto.

Há quem sustente, com boas razões, que o estado atual da teoria das cordas se assemelha mais a uma proposta filosófico-matemática, ou a uma ideia metafísica, do que a uma proposta científica em todo o sentido da palavra. A teoria faz algumas previsões acerca de certos padrões específicos no CMB e da amplitude das ondas gravitacionais primordiais, como as descobertas pelo *BICEP2*. No entanto, nenhuma destas previsões foi ainda confirmada. Em particular, a existência de interações entre branas poderá vir a ser sustentada, dentro de alguns anos, a partir da análise de dados do fluxo escuro, que parece sugerir que todas as estruturas do universo se movem para um ponto particular no céu — poderá ser o ponto de contacto entre duas branas?

Apesar das suas claras limitações experimentais, não se esperam confirmações tão surpreendentes de nenhuma outra teoria. A ideia de que diminutos objetos unidimensionais possam fornecer uma compreensão total do universo é motivação suficiente para muitos cientistas. O futuro — espero que próximo — mostrar-nos-á, finalmente, se a teoria das cordas é a ToE, a Teoria de Tudo, ou a teoria do nada; infelizmente, para esta teoria não há meios-termos.

E AS CONDIÇÕES INICIAIS SÃO... UM UNIVERSO EM ESPELHO?

A segunda história da cosmologia quântica é a arqui-inimiga da teoria das cordas e tem uma solução que eu chamaria pouco ortodoxa para o problema das condições iniciais. Martin Bojowald (1973-) é um físico teórico alemão especializado em gravitação e professor de Física na Universidade Estadual da Pensilvânia. Este cosmólogo é um dos principais teóricos da cosmologia quântica em loop (*Loop Quantum Cosmology*, *LQC*), uma proposta que teve início nos anos noventa e que postula soluções para os problemas do SBB, a partir de novas formulações da gravidade e do espaço-tempo.

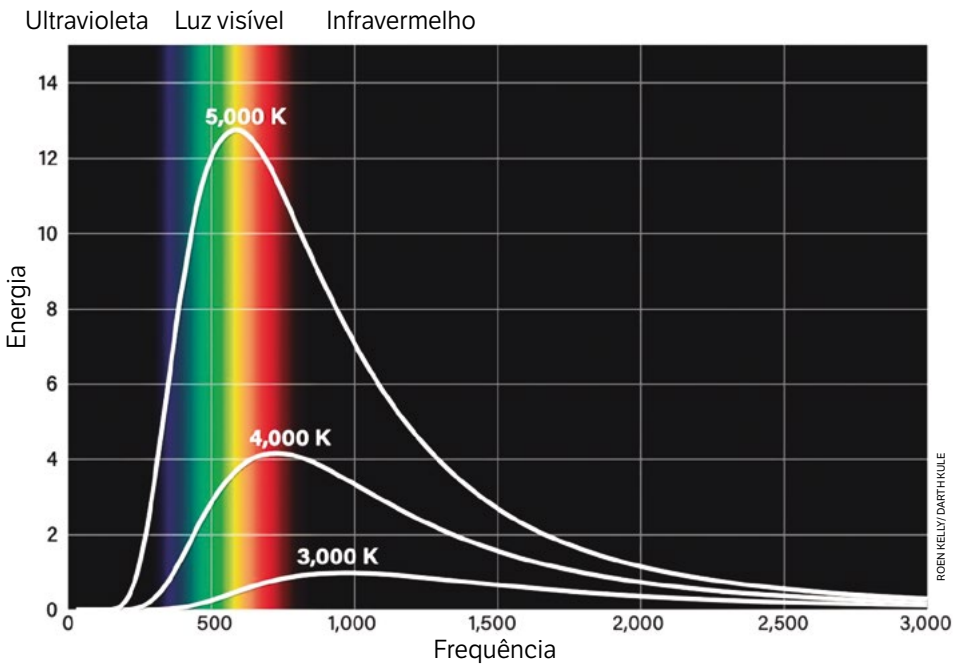
O elemento principal desta teoria é o espaço. A noção relativista indica-nos que o espaço é uma estrutura contínua ligada ao tempo. Ainda assim, desde o início do século XX, a mecânica quântica deu-nos a conhecer que o comprimento mínimo mensurável — ou existente, questão ainda não resolvida — é o comprimento de Planck. Isto leva cosmólogos como Bojowald a propor que o espaço não é contínuo, como sugeriu Einstein, mas deve ser discreto e estar constituído por «átomos de espaço» de 10^{-35} m. Deste modo, a LQC é, basicamente, uma nova teoria do espaço-tempo.

EXISTE UM HIPERESPAÇO POVOADO POR D-BRANAS, LÂMINAS TRIDIMENSIONAIS, E O NOSSO UNIVERSO É APENAS UMA DELAS

CADA UM DOS ÁTOMOS DE ESPAÇO PODE CONTER UMA GRANDE QUANTIDADE DE ENERGIA, MAS FINITA

A proposta apresenta um argumento coerente e, do meu ponto de vista, convincente. Primeiro, se considerarmos que o tecido do espaço é contínuo, qualquer medição que realizarmos poderá assumir valores infinitos, em particular um tão próximo de zero quanto a medição o permita. Pelo contrário, se o espaço for discreto, isto é, se estiver composto por pequenas unidades, uma medição só poderá devolver múltiplos dessa unidade. Isto não é diferente da circunstância enfrentada pelo físico alemão Max Planck (1858-1947), em 1900, quando descobriu que a luz só podia assumir valores múltiplos de um valor — a constante de Planck —, dando origem à teoria quântica. Por este motivo, não é descabido afirmar que esta primeira noção da LQC tem o mesmo sustentáculo de uma teoria que se tem mostrado imbatível até ao momento, bem, exceto no caso da singularidade.

Ainda que o espaço possua uma geometria discreta, para efeitos práticos, parece contínua. O menor valor de volume que poderia ser medido, se o espaço estiver conformado por unidades do comprimento de Planck, é de 10^{-99} cm^3. Isto quer dizer que poderiam encontrar-se 10^{-99} átomos de espaço em cada centímetro cúbico — um valor exorbitante! Haveria mais átomos de espaço-tempo num centímetro cúbico do que centímetros cúbicos no nosso universo observável, cujo valor se calcula em 10^{85} cm^3. Pense ainda que existiriam mais unidades de



O espectro de um corpo negro é um mapa característico da intensidade da luz em função do seu comprimento de onda.

espaço num pequeno cubo de açúcar de um centímetro do que partículas no universo que conhecemos.

Com base nesta apreciação, os teóricos da LQC estimam que podem superar a singularidade que deu origem ao universo há 13 700 Ma. No entanto, formular e resolver as equações de campo para um espaço-tempo granular é algo que poucos cosmólogos no mundo, como Bojowald, podem fazer. A razão é que se devem deixar de lado as equações diferenciais relativistas que descrevem um espaço-tempo a grandes escalas e em regime de baixa energia, como o nosso, para dar lugar a equações de diferenças que o fracionam em intervalos discretos, a fim de o descrever a energias elevadíssimas — como no universo primigenio. Na LQC, a estrutura fina do espaço é a propriedade que desempenha o papel principal.

Se recordar que a gravidade proposta pela relatividade não é uma força, mas um efeito criado pela geometria e deformação do espaço-tempo, poderá fazer uma ideia de que uma formulação que conceba uma estrutura do espaço distinta da einsteiniana também modificará, a certa altura, a natureza e o comportamento da gravidade.

AIP EMILIO SEGRÈ VISUAL ARCHIVES

Max Planck é reconhecido como o pai da teoria quântica e por postular que a energia não é contínua.

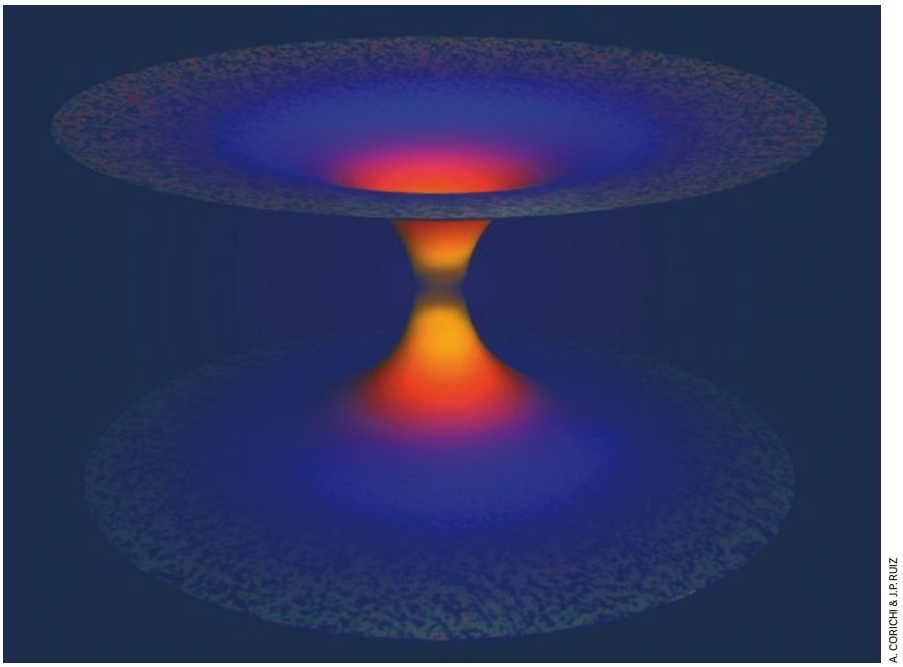
Em primeiro lugar, um espaço granular só poderia armazenar uma quantidade finita de energia, ao contrário do espaço relativista que pode armazenar quantidades infinitas. Esta situação é análoga a uma esponja. Imagine que tem uma esponja e a aproxima de uma pequena poça de água. O líquido é absorvido, certo? Mas agora imagine que planeia absorver uma maior quantidade de água, digamos, a contida num pequeno balde. Se introduzir a esponja no balde, o que observa quando a retira? Efetivamente, a água escorre da esponja. Agora, se apertar a esponja sairá mais água, o que indica que houve, de facto, absorção, mas não a suficiente para secar o balde. Isto permite concluir que a esponja só pode absorver uma quantidade limitada de líquido e que o resto é repelido.

O mesmo ocorre com o espaço. Cada um dos átomos de espaço pode conter uma grande quantidade de energia, mas finita, ao fim e ao cabo. Quando a energia supera o valor-limite, o espaço repele-a, nada mais e nada menos que com um efeito antigravitacional. Desta forma, a gravidade, a energias elevadíssimas, muda de campo e desempenha o papel oposto: repele a energia restante que tente armazenar-se no espaço.

Se este trecho da nossa viagem cósmica lhe pareceu interessante, creio que vem algo melhor. Se rebobinarmos o filme do universo em expansão, este irá diminuindo de tamanho e aumentando a sua densidade. Finalmente, chegamos

a um instante em que a densidade de energia é igual a um bilião de sóis comprimidos na área de um protão. O espaço está apinhado e não pode armazenar mais energia. No entanto, nesta viagem para trás no tempo, o universo insiste em continuar a contrair-se, luta por chegar a uma singularidade, apesar de os átomos de espaço-tempo lho não permitirem. Então, algo extraordinário ocorre. O filme detém-se num instante finito no tempo e, tal como uma supernova expulsa com grande força a matéria que tenta chegar ao seu núcleo, cada ponto do espaço repele com veemência tudo o que tenta continuar a condensar-se nele. Surge assim um efeito antigravitacional como o que Guth atribui ao campo do inflaton. A partir desse momento, o universo inicia uma expansão acelerada até que a densidade de energia em cada ponto do espaço diminui o suficiente para que continue a expandir-se mais modestamente graças à inércia, e a gravidade começa o seu trabalho de agrupar matéria por todo o lado.

Ao contrário da teoria inflacionária, que acrescenta um campo escalar *ad hoc* ao modelo cosmológico do Big Bang, a LQC sustenta que a expansão acelerada e o superarrefecimento são consequência das limitações naturais do espaço-tempo para armazenar energia. É uma ideia que, para mim, de um ponto de vista não técnico, é bastante apelativa. Contudo, é muito provável que esteja a fazer a mesma pergunta que eu fiz há algum tempo. Se não rebobinarmos o filme, mas começarmos a vê-lo desde o princípio, a partir do ponto em que o universo se deteve há algumas linhas: de onde saiu esse estado com uma densidade de um bilião de sóis na área de um protão, que já não podia suportar mais energia? Embora este ponto possa parecer uma singularidade, só que com curvatura, densidade e temperatura finitas, na realidade não o é. A fita que rebobinámos é nada



A. CORICHI & J.P. RUIZ

A cosmologia quântica em loop é uma teoria em desenvolvimento que ainda não pode ser descartada nem comprovada experimentalmente, mas os seus inícios são promissores.

O NOSSO UNIVERSO MORRERÁ COMO NASCEU: MUITO QUENTE E COM UMA DENSIDADE E CURVATURA MUITO ALTAS

mais do que o filme para a frente, rumo ao futuro, de um universo anterior que colapsou e ricocheteou para dar origem ao nosso. Sim, creio que não me engano: os cosmólogos chamam a isto o «ricochete do universo».

Bojowald e outros teóricos da LQC sugerem que esse ponto há 13 700 Ma não é propriamente a origem do universo como um todo, como o sugere o Big Bang, mas a transição entre a morte por colapso de um universo anterior e o nascimento do nosso. Há mais de 13 700 Ma existia um universo, um como o nosso, que teve um final quente, um Big Crunch, como lhe chamam os cosmólogos. A dada altura, esse universo deixou de se expandir e, pouco a pouco, a gravidade começou a agrupar tudo novamente até chegar ao limite permitido; o espaço-tempo repeliu-o e deu origem ao nosso universo em expansão.

Algumas das soluções que Martin Bojowald encontrou para as equações da LQC indicam que a região de espaço-tempo que precedeu o ricochete é precisamente uma imagem especular — uma imagem em espelho — do nosso universo. Assim, a única variável diferenciável entre ambos é que o universo pré-ricochete era conformado por antimatéria: galáxias de antimatéria, estrelas de antimatéria e pessoas de antimatéria; as leis da física seriam exatamente as mesmas. É outra forma de dizer que as condições iniciais do nosso mundo poderiam estar definidas pelas características do universo anterior. Pelo contrário, a descoberta de uma expansão acelerada permite colocar a hipótese de que o nosso universo diminuirá a sua densidade no futuro — diluir-se-á. Desta maneira, tendo em conta a simetria temporal, a imagem especular do universo anterior ao nosso seria a de um universo diluído, quase vazio, no final da sua existência. Até ao momento, os teóricos da LQC debatem-se entre distintas possibilidades.

Em resumo, esta teoria diz-nos que o que chamamos universo é um ciclo interminável de espaços-tempos que se expandem e colapsam até e desde o infinito. O termo «laço» do nome da teoria não tem outra conotação senão a volta ao ponto de partida, um ciclo que se repete... muitas vezes? Também é incrível para mim, mas ao que parece, sim. Isto poderia sugerir, no final, que o nosso universo morrerá como nasceu: muito quente e com uma densidade e curvatura muito altas, para dar origem a outro — um universo-bebé que já tem o seu destino definido.

A cosmologia quântica em loop é uma teoria em desenvolvimento que ainda não pode ser descartada nem comprovada experimentalmente, mas os seus inícios são promissores. Por exemplo, alguns investigadores propuseram que um espaço discreto poderia afetar a propagação da luz a longas distâncias quando o seu comprimento de onda é pequeno. Se o espaço não é contínuo, a luz que nele se propaga também não o poderá ser, pois a onda terá de se adaptar à tessitura do espaço. Quanto mais curto for o comprimento de onda — quanto mais se aproximar do tamanho dos átomos de espaço-tempo —, maior será a distorção provocada. Em consequência, cada uma das frequências poderia ter a sua própria velocidade que, embora imperceptível na maioria dos casos, poderia ser medida

quando as diferenças se acumulam após longas viagens pelo cosmos.

Se não adormeceu na viagem, poderá dar-se conta de que o anteriormente referido é outra forma de afirmar que c não é estritamente uma constante. Em particular, uma comprovação experimental deste tipo iria ao encontro da teoria VSL que Albrecht postulou em algum momento e que, para a minha neófita intuição de cosmólogo, é bastante agradável. Preferiria um universo onde a velocidade da luz varie de alguma maneira, e talvez a estrutura discreta do espaço seja a chave.

Finalmente, considero que a LQC não resolve o problema da origem do universo como tal, mas sim o desloca, estipulando um laço de criação-aniquilação sem fim; uma nova formulação da visão newtoniana segundo a qual o universo sempre existiu e existirá. Nesses termos, o universo seria finito no espaço, mas infinito no tempo. Embora esta seja uma ideia que não se ajusta completamente à minha filosofia sobre o mundo, é uma probabilidade assombrosa.

A PAISAGEM CÓSMICA E OS MILHÕES DE UNIVERSOS

Já falámos de Leonard Susskind como um dos criadores da teoria das cordas há quatro décadas. Contudo, o seu trabalho não termina aí. Este físico teórico norte-americano da Universidade de Stanford é um dos cosmólogos mais destacados da nossa era, pelos seus contributos fundamentais à teoria quântica da informação e aos modelos de universo, particularmente um denominado «paisagem cósmica».

Esta teoria deriva do intrincado mundo das cordas e das branas e, por estranho que pareça, pode ser uma solução, ou, por outro lado, uma amplificação do problema do horizonte. Matematicamente, descrever a paisagem cósmica é algo apenas para os mais avezados em física e matemática, mas pode dizer-se que cada uma das soluções possíveis traz à existência diferentes forças da Natureza, partículas, dimensões e parâmetros que destinariam de maneira muito distinta o universo.

Susskind acredita que o universo não tem de adquirir necessariamente determinadas dimensões, partículas e leis da física; o espaço pode ser tão grande que é possível que coexistam diferentes configurações em subuniversos desconectados causalmente. Assim, as condições iniciais seriam produto da nossa localização numa determinada região do espaço, uma entre muitas. Os habitantes de outras regiões podem estar a fazer a mesma pergunta sobre as condições iniciais do seu universo observável. A resposta pode não ser muito melhor do que «porque essas são as condições do lugar onde nasceu». Isto é algo semelhante a perguntar: por que sou colombiano? O que há por trás de eu ser colombiano? Simplesmente, tive a sorte de nascer na Colômbia; essa é toda a história. Do mesmo modo, nascemos numa região do universo com certas condições e constantes; não há mais que contar.

SUSSKIND ACREDITA QUE O UNIVERSO NÃO TEM DE ADQUIRIR DETERMINADAS DIMENSÕES, PARTÍCULAS E LEIS DA FÍSICA

SHUTTERSTOCK

A paisagem cósmica. O nosso universo poderia ser similar à Terra e aos seus diferentes ecossistemas. Por exemplo, o facto de nos situarmos numa região de montanha não implica que todas as regiões da Terra possuam as mesmas características; podem encontrar-se também selvas, desertos e savanas. Analogamente, a região que habitamos no universo pode ser uma das muitas possíveis.

Embora seja uma situação difícil de imaginar, pode ser mais familiar do que pensamos. Aqui na Terra podemos observar milhares de espécies de insetos, e em nenhum momento nos perguntamos por que certo escaravelho é como é, a natureza das suas características e por que é negro e não verde. Simplesmente assumimos que é apenas uma das milhares de espécies de escaravelhos possíveis e que, pelas suas características, foi beneficiada no processo evolutivo.

Do mesmo modo, o nosso universo é um desses milhões de universos possíveis. No fundo, não tem nenhuma razão de ser específica; pelas suas características, sobreviveu a um processo de evolução cósmica. Houve outros universos que já colapsaram pela ação da gravidade, outros que se dilaceraram pela energia do vácuo, outros onde a força nuclear forte é maior, outros onde não há eletromagnetismo, outros parecidos com o nosso mas sem as condições para suportar a vida, etc.

Susskind acredita que este magnífico sistema é regido por processos quânticos que conduzem a um processo de superseleção, no qual sobrevivem os universos que nascem mais ordenados, como o nosso, e morrem os universos cujos estados iniciais não são favoráveis. Deste modo, este hotel que não cabe nas nossas mentes conta com 10^{500}–10^{1000} quartos, que correspondem a diferentes lugares energéticos disponíveis para que diferentes ondas de universo os ocupem. Embora pudesse existir um número infinito de hóspedes interessados em conseguir um quarto, alguns deles descobrem que o sítio energético já foi ocupado. Assim, o sistema assegura que dois universos não possam partilhar um mesmo lugar energético, e que o lençol cósmico seja enorme.

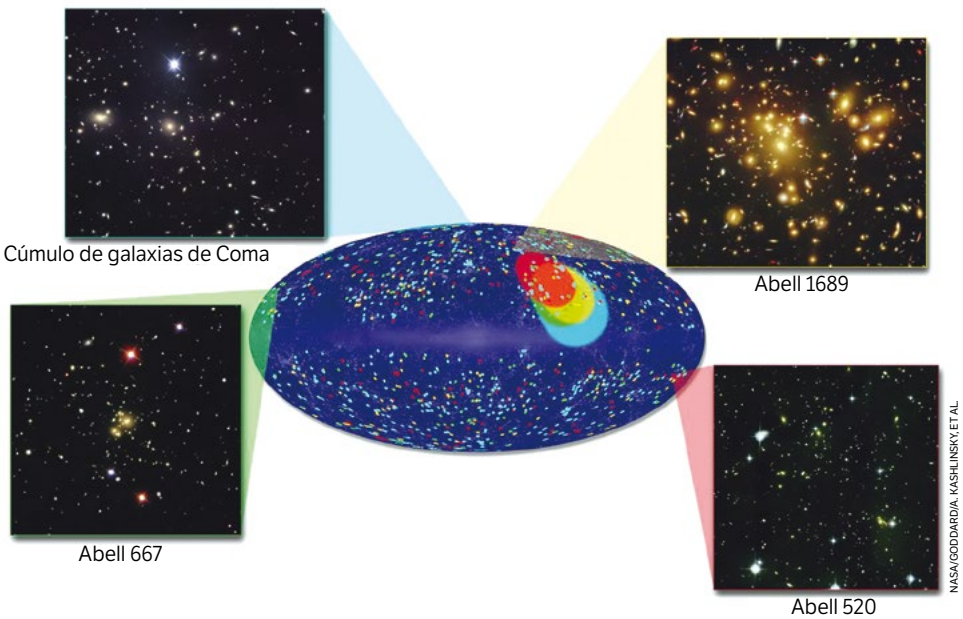
ESCONDE-SE UM UNIVERSO NO HORIZONTE?

Alexander Kashlinsky (1957-) é um cosmólogo e astrónomo, nascido na Letónia, que trabalha no Laboratório de Cosmologia Observacional da NASA. É mundialmente conhecido porque a sua descoberta de um padrão de movimento estranho nos céus poderia entusiasmar muitos; «se a ideia atual for confirmada, terá profundas implicações para o entendimento da estrutura global do espaço-tempo e do nosso lugar no universo».

Recorde as velocidades peculiares e de recessão galáticas. Os aglomerados de galáxias são concentrações massivas de matéria escura, galáxias e gás a milhões de graus de temperatura. Este gás afeta os fotões do CMB, produzindo uma mudança de frequência que reflete a diferença do movimento de cada aglomerado em relação à expansão geral do universo. O resultado desta interação é uma minúscula mudança na temperatura do CMB na direção do aglomerado, um fenómeno denominado efeito Sunyaev-Zel'dovich.

Estudando metodicamente este efeito, Kashlinsky encontrou algo inesperado. Fazendo uso de um catálogo de cerca de 1000 aglomerados de galáxias, dos dados de cinco e sete anos da Sonda Wilkinson de Anisotropia de Micro-ondas (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*, *WMAP*) e detetando raios X de diferentes fontes, encontrou um dípolo galático associado à distribuição das velocidades peculiares nos aglomerados de galáxias. Por outras palavras, este cosmólogo descobriu que as galáxias se moviam, de forma peculiar, numa direção — algo a que ele próprio denominou fluxo escuro.

Parece que os aglomerados galáticos situados entre 0,3 e 1 Gpc — a partir da nossa posição — se movem com velocidade constante ao longo de uma linha que se estende desde o nosso Sistema Solar até uma região de uns 20º de diâmetro, no



O Fluxo Escuro desafia os modelos cosmológicos e sugere a existência de estruturas gigantescas a exercer uma atração gravitacional do «outro lado» do horizonte cósmico.

KASHLINSKY DESCOBRIU QUE AS GALÁXIAS SE MOVIAM, DE FORMA PECULIAR, NUMA DIREÇÃO, E CHAMOU-LHE FLUXO ESCURO

sul das constelações do Centauro e da Hidra, nas coordenadas cósmicas 278 ± 18, 2,5 ± 15. Mais impressionante ainda, propôs-se que, devido ao campo abrangido por este invulgar movimento galático, é possível que alcance todo o universo observável.

A forma como Kashlinsky interpreta o dípolo galático é que a matéria pode estar a ser gravitacionalmente atraída por algo para além da orla do universo. Considera que pode existir uma espécie de limite no nosso universo observável que interage com outra região fora do nosso campo de visão. Como veremos no próximo avatar, habitualmente os cosmólogos assumem que, se existirem outras regiões de universo, estas são tão planas e homogéneas como a nossa, mas esta descoberta demonstra que poderão ter uma surpresa.

Esta descoberta sacudiu o campo da cosmologia e, embora alguns não estejam totalmente convencidos, Laura Mersini-Houghton, cosmóloga e física teórica da Universidade da Carolina do Norte, viu nela um eco das suas previsões de universo baseadas na existência de inomogeneidades, nós de matéria e entrelaçamento não local com objetos massivos para além do nosso horizonte. Da sua perspetiva, o universo observável poderia ser somente uma região inflacionada, homogénea, parte de um espaço-tempo não homogéneo a escalas maiores do que o raio de Hubble.

Do mesmo modo, esta descoberta é boa para os teóricos da paisagem cósmica, que haviam predito a existência de um gigantesco vazio de uns 200 Mpc a z ~1, e certas características na amplitude das flutuações do CMB que também podem ser confirmadas pelos achados de Kashlinsky. O desvio das galáxias poderia ser produto da interação gravitacional com outra região de espaço-tempo, desconhecida para nós. Ou, por que não, como crê Mersini-Houghton, a prova de que um universo vizinho se aproxima de nós.

Atualmente, considera-se que as possibilidades de que isto seja uma realidade física são suficientemente boas para que físicos como Leonard Susskind, Laura Mersini-Houghton, Brian Greene e John Barrow apostem por este modelo de multiverso. Se o nosso universo é como um hotel cósmico, é possível que possamos detetar a presença de outros hóspedes nele através da gravidade. Poderemos visitar alguma vez essas outras regiões? Até ao momento é uma possibilidade muito remota. Mesmo que lá conseguíssemos chegar, é possível que as nossas regiões vizinhas possuam leis da física tão distintas que nos destruam quando nos aproximarmos.

Há centenas de anos — e mesmo alguns hoje em dia —, consideravam que a Terra era o centro de toda a criação. Durante o século passado, aprendemos a aceitar que vivemos numa pequeníssima região de uma galáxia, num universo inimaginavelmente extenso. Agora, pode ser o momento para outra mudança de perspetiva. O nosso próprio universo pode ser parte de uma gigantesca manta de retalhos que se encontra para lá das nossas mais loucas e extravagantes suposições. ■

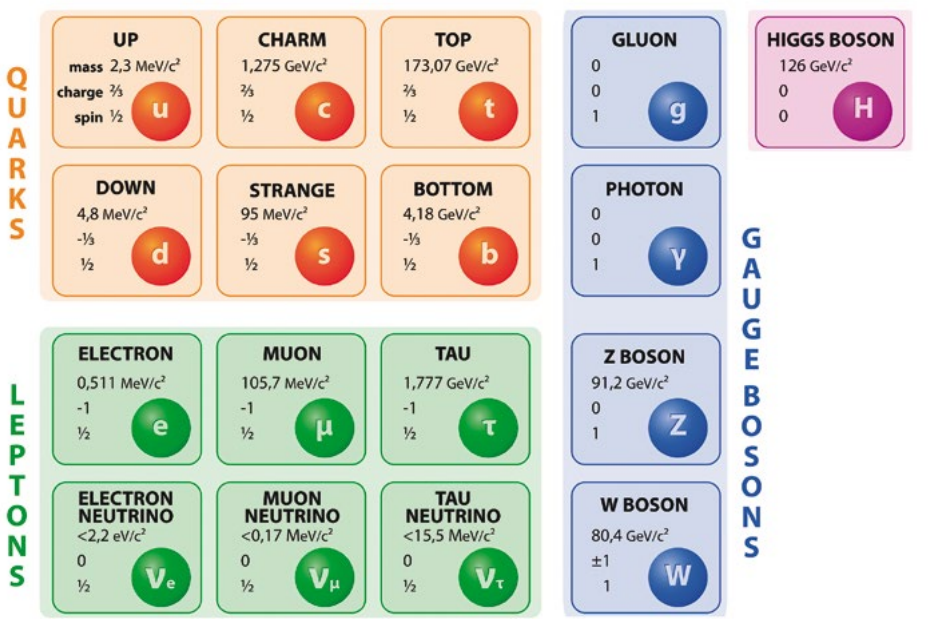
SHUTTERSTOCK

A matéria e a balança do Sr. Higgs

O contacto com a matéria no quotidiano é a experiência mais próxima do que chamamos «realidade». O Sol, a Terra, o nosso corpo, o mar, as montanhas… são diferentes formas de organização da matéria; somos matéria e vivemos num mundo feito de matéria que podemos observar graças à luz. Seja por emissão própria, seja por reflexão, os átomos que compõem a matéria podem emitir fotões que detetamos com os olhos, no espetro visível, ou com outros instrumentos de observação, nos restantes domínios do espetro.

Embora estas propriedades possam parecer muito familiares, e até óbvias em muitos casos, no âmbito da física elas encerram duas questões fundamentais ainda por resolver: a origem da matéria e a origem da massa. Os cientistas continuam a tentar compreender por que razão o universo está cheio de matéria e como esta adquiriu a sua massa nos instantes posteriores à inflação. Em termos mais correntes, os físicos ainda têm de desvendar o motivo do nosso peso quando nos colocamos numa balança. Pode parecer evidente, mas, ironicamente, a aparente simplicidade desta pergunta esconde uma profunda complexidade.

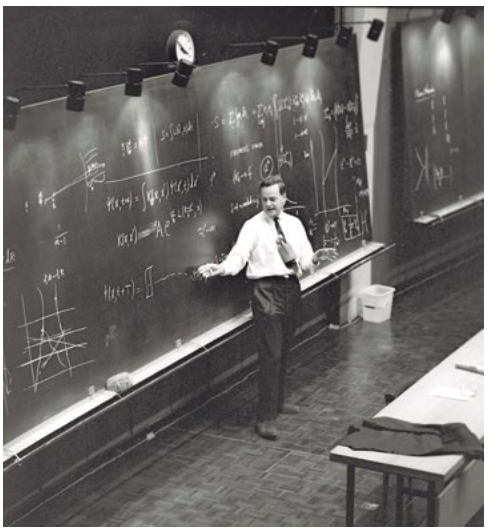
Comecemos pela matéria. Há séculos que o ser humano concebe a matéria como a substância de que tudo é feito. Partindo do ar, do fogo, da terra e da água, a nossa noção de constituintes fundamentais evoluiu até à ideia moderna do átomo e das partículas elementares. O Nobel da Física Richard Feynman (1918-1988) considerava que, se a Terra sofresse uma catástrofe que fizesse perder por completo o avanço teórico e tecnológico da humanidade, o mais relevante que poderíamos dizer às gerações chamadas a reconstruir a civilização seria: «tudo é feito de átomos».



SHUTTERSTOCK

Modelo Padrão da física de partículas. O diagrama classifica as doze partículas de matéria (quarks e léptons) e os bosões das forças fundamentais, com o bosão de Higgs.

Com efeito, uma das grandes descobertas científicas foi perceber-se que todo o universo, na sua complexidade e magnificência, é constituído pelos mesmos elementos primordiais que as pessoas, os livros, as plantas e os sonhos. Ao longo de todo o século XX, acumulou-se uma quantidade ingente de informação que permitiu, por volta da década de oitenta, estabelecer uma teoria que classifica de forma exaustiva os componentes fundamentais de tudo o que existe: o Modelo Padrão da física de partículas (*Standard Model*, SM). De seguida, descreveremos algumas das suas características gerais, concentrando-nos particularmente nos aspetos que serão úteis para o que vem a seguir. Quem desejar aprofundar o Modelo Padrão encontrará abundante bibliografia de divulgação científica dedicada ao tema.



CERN

O físico teórico Richard Feynman a proferir um colóquio no CERN (Genebra), em 17 de dezembro de 1965.

O conjunto das partículas elementares conhecidas até 2024, nas suas diferentes combinações, dá origem a outras partículas que lhe serão mais familiares, como os protões, os neutrões e os eletrões que formam os átomos, os elementos da tabela periódica. Por serem fundamentais, presume-se que estas partículas não têm outros constituintes; são os pedaços mais pequenos de matéria que podem existir.

As partículas elementares dividem-se em dois grandes grupos: bosões e férmions. Os bosões transmitem as forças ou constituem campos quânticos, como o eletromagnético, e não se agregam para constituir outras partículas, pelo que serão sempre detetados na sua forma primordial. Por sua vez, os férmions podem ser divididos em dois subgrupos: quarks e léptons. Nunca foi detetado um quark isolado; encontram-se sempre ligados formando outras partículas, denominadas hádrons, cuja principal característica é interagirem através da força nuclear forte, que é transmitida por um bosão: o gluão. Por sua vez, os hádrons dividem-se em dois grupos. Em primeiro lugar, os mésons, partículas de vida curta constituídas por um quark e um antiquark. Os mésons podem ser detetados em aceleradores de partículas ou na atmosfera, como produto das interações entre os raios cósmicos e os gases terrestres. Por outro lado, os bárions, partículas de vida longa constituídas por *quarks up* e *quarks down*, que formam os constituintes dos núcleos atómicos: os protões e os neutrões.

OS CIENTISTAS AINDA LUTAM POR COMPREENDER POR QUE RAZÃO O UNIVERSO ESTÁ CHEIO DE MATÉRIA

A segunda subdivisão dos férmions, os léptons, é um grupo constituído por partículas muito mais leves do que os hádrons. O membro mais conhecido deste grupo é o eletrão, acompanhado por dois «irmãos» mais pesados, o muão e o tau, e por três partículas fantasmagóricas associadas a cada um deles: os neutrinos. Guarde este nome, porque mais adiante voltaremos a falar deles.

Anexa a esta grande família está o grupo das antipartículas, também elas elementares e exatamente iguais às que acabámos de descrever, exceto na sua carga elétrica. O sinal de uma antipartícula é sempre contrário ao da sua gémea; por exemplo, a antipartícula do eletrão é o pósitron. No caso de partículas sem carga, como o fotão e o gravitão, elas próprias são partícula e antipartícula.

Ora, as circunstâncias que deram origem a este autêntico «zoológico» de partículas são bastante complexas e, ao mesmo tempo, enigmáticas. Aqui exploraremos dois aspetos desse processo: a fase do reaquecimento, que mencionei brevemente antes, e a bariogénese, um fenómeno descrito pelo SM. Ambas se perfilam como as hipóteses mais explicativas e hoje mais aceites para responder à pergunta sobre a origem da matéria. No entanto, têm sido alvo constante de revisão e novas indagações desde a década de sessenta.

ROLANDO ATÉ AO FUNDO DA ENCOSTA

O reaquecimento é um dos fenómenos menos conhecidos pelos amantes da cosmologia, mas é um dos mais importantes do universo primordial. É, pois, bastante provável que seja a primeira vez que o leitor se depara com este tema; se assim for, espero ser suficientemente claro na exposição e, caso contrário, estou certo de que poderá complementar o seu conhecimento.

O termo foi estabelecido nos primeiros modelos inflacionários, quando se postulava que, antes da expansão acelerada, o universo tivera temperaturas altíssimas e que, posteriormente —após o superarrefecimento—, a sua temperatura aumentara de novo: houve um reaquecimento. Contudo, nas versões mais avançadas da inflação, o estado quente pré-inflacionário não é necessário. Por essa razão, a denominada fase de reaquecimento é, na realidade, a primeira vez em que o universo esteve quente, ou pelo menos assim creem os cientistas.

Retomemos a inflação, agora na sua vertente energética. Recorde o que foi dito sobre o estado de energia mais baixo para o qual todos os sistemas tendem. Sustenta-se que, depois de libertar toda a sua energia potencial para expandir o universo, o inflatão chegou ao fundo da sua encosta energética e deteve-se instantaneamente. Ao fazê-lo, condensou-se num estado de Bose–Einstein e cedeu a sua energia de forma progressiva ou instantânea —consoante o modelo. Esta mudança de fase entre um universo que se inflaciona sem matéria e um universo com matéria é o que se denomina reaquecimento.

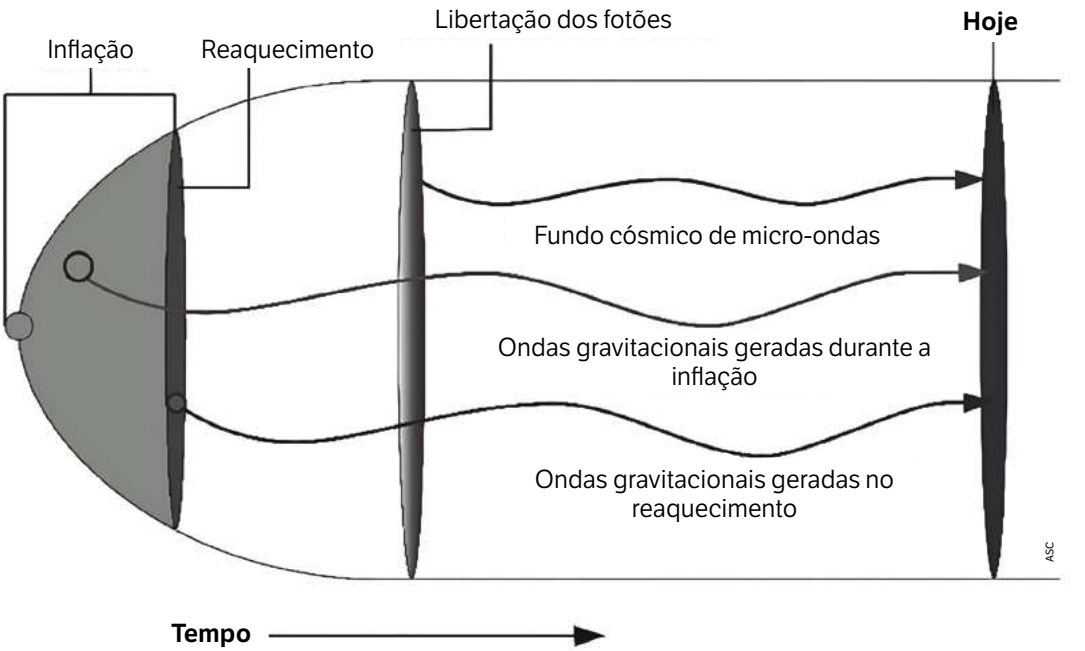
O REAQUECIMENTO É UM DOS FENÓMENOS MENOS CONHECIDOS PELOS AMANTES DA COSMOLOGIA

A encosta do universo primordial. O campo do inflatão começou com energia potencial elevada. Depois de «rolar» pela encosta e provocar a expansão acelerada do universo, assentou no seu ponto de energia mais baixo e toda a sua energia se condensou em matéria.

Assim, a energia potencial acumulada no vácuo condensou-se para dar lugar à matéria. Num lapso de tempo ínfimo, deu origem a vários tipos de campos e partículas primordiais. Entre eles, um campo escalar, como o Campo de Higgs; um campo vetorial, como o eletromagnético; férmions, como os quarks; e a esquiva matéria escura. Deste modo, a teoria da inflação propõe que toda a matéria e toda a radiação emanam da mesma fonte energética que impulsionou a superexpansão primordial. Este conceito revolucionário oferece uma nova perspetiva sobre a origem do universo, ligando a microescala das partículas fundamentais à macroescala da expansão cósmica.

A matéria recém-criada apresentava densidades extremas e propagava-se a uma velocidade muito próxima da da luz. Estima-se que isto produziu colisões altamente energéticas, um conjunto de ondas de choque relativistas e simétricas denominado Fundo de Ondas Gravitacionais (*Gravitational Wave Background*, GWB), que viajam livremente pelo espaço entre 10^7 e 10^9 Hz. Por esta razão, vários especialistas defendem que a fase de reaquecimento deve ser interpretada como a verdadeira grande explosão.

Um leitor inquieto poderá perguntar: a que cedeu a sua energia o inflatão, se esse campo era a única coisa que existia? Embora seja uma pergunta excecional, receio desiludi-lo com a resposta: os físicos não o sabem, porque se desconhecem as formas de interação energética do inflatão e as transformações específicas a que deu lugar para energias entre 100 e 10^{15} GeV. O que é claro, em teoria, é que essa cedência de energia produziu, em menos do Tempo de Hubble (T_H), toda a entropia do cosmos, as ~10^{88} partículas que se encontram no nosso horizonte observável, com uma temperatura homogénea de 10^{29} ^{0}K — a temperatura do reaquecimento.



Fundo de ondas gravitacionais. Considera-se que as ondas gravitacionais primordiais são o registo fóssil mais antigo que poderá ser detetado no universo. Ao contrário da luz, as vibrações do espaço-tempo não seriam ofuscadas pela LSS e por outras interferências eletromagnéticas. Uma deteção deste tipo poderá ser feita por interferometria laser, como planeia a missão espacial *LISA* na próxima década, ou pela sua pegada na polarização do CMB.

Os diferentes modelos inflacionários fazem várias previsões sobre o reaquecimento, entre elas as características das ondas gravitacionais primordiais geradas pela matéria recém-criada. Espera-se que alguns projetos de observação, como o *Laser Interferometer Space Antenna* (*LISA*), da ESA e da NASA, previsto para a década de 2030, ofereçam uma lente para as ondas gravitacionais geradas nesse período. Embora o principal objetivo do *LISA* seja detetar ondas gravitacionais provenientes de fontes como a fusão de buracos negros supermassivos e estrelas de neutrões, este dispositivo poderá também aproximar-nos do Big Bang.

O modo como o *LISA* funcionará baseia-se em monitorizar a distância entre um conjunto de três «cápsulas» dispostas em triângulo equilátero, com cada lado a medir aproximadamente 2,5 milhões de quilómetros. Os satélites estarão equipados com lasers capazes de medir com precisão minúscula as distâncias entre eles. Se uma onda gravitacional atravessar o *LISA*, distorcerá o espaço-tempo local, produzindo uma alteração minúscula nas distâncias que os aparelhos poderão registar. Esta deteção proporcionará também uma janela única para as leis da física a energias muito mais altas do que as alcançáveis com os aceleradores de partículas na Terra. No entanto, apesar de ser teoricamente possível, a deteção direta das ondas gravitacionais primordiais é um desafio técnico enorme.

ONDE ESTÃO OS ANTIÁTOMOS?

O reaquecimento fornece o mecanismo que explica como se formou a matéria. Até agora, quando mencionávamos «matéria», referíamo-nos a todas as partículas em geral, incluindo tanto a matéria como a antimatéria. Porém, nesta secção vamos diferenciá-las. Esta distinção é crucial, pois, embora a matéria e a antimatéria sejam em muitos aspetos simétricas, a sua assimetria no universo observável é um dos grandes mistérios da física moderna.

Os bárions são os «blocos» do universo observável. As observações astronómicas e a deteção de partículas cósmicas na Terra indicam-nos que a Via Láctea, o espaço interestelar e as galáxias distantes são feitos de matéria. Por seu lado, o grupo da antimatéria é composto por partículas menos comuns que se detetam quando a matéria decai ou se desintegra. Embora sejam exóticas, estão bem descritas pelo SM e até já deram origem a aplicações práticas. Uma técnica de imagiologia cerebral, a tomografia por emissão de positrões, deteta os pósitrons que emanam do cérebro quando um composto instável injetado no sangue se desintegra.

A antimatéria não foi detetada em primeira instância: foi predita pelo físico teórico britânico Paul Dirac (1902-1984), no contexto do seu esforço para unificar a relatividade e a mecânica quântica. Dirac postulou que, para cada partícula de matéria, deveria existir uma partícula com as mesmas características mas com carga oposta. Em particular, previu a existência de um eletrão positivo.

Cinco anos depois, Carl Anderson (1905-1991), físico experimental norte-americano e professor no Caltech, encontrou uma partícula com as características previstas por Dirac enquanto fotografava os rastos deixados pelos raios cósmicos numa câmara de ionização. Batizou a sua descoberta de positrão. Esta partícula era um reflexo em espelho do eletrão; todos os seus fenómenos eram invariantes sob a carga (C), a conjugação de paridade (P) e a reversibilidade no tempo (T): o chamado teorema CPT. Pela descoberta do positrão, Anderson foi galardoado com o Nobel da Física em 1936. Muitos historiadores consideram o descobrimento da antimatéria um dos feitos mais importantes do século XX.

Felizmente, tal como observou Anderson, a antimatéria não se encontra em quantidades abundantes à escala natural, porque, se assim fosse, ocorreria algo catastrófico. É sabido que, quando a matéria se encontra com a antimatéria, ambas as partículas se aniquilam mutuamente e transformam 100% das suas massas em energia. Por esta razão, considera-se que este tipo de reação seria a fonte energética mais eficaz, dado que as maiores fontes que conhecemos, como a fusão nuclear, têm um rendimento de cerca de 5%. No entanto, esta mesma característica faz com que, por agora, a antimatéria esteja praticamente confinada aos aceleradores de partículas. Se o leitor for tão jovem como eu, é provável que ainda venha a testemunhar as primeiras aplicações da antimatéria como fonte energética para a população em geral.

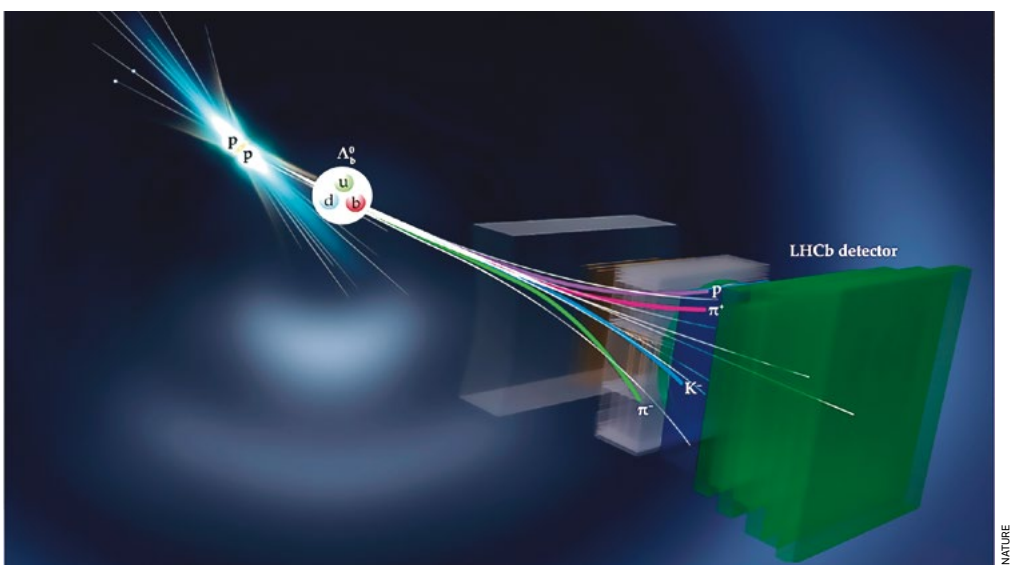
LISA MONITORIZARÁ A DISTÂNCIA ENTRE UM CONJUNTO DE TRÊS CÁPSULAS DISPOSTAS EM TRIÂNGULO EQUILÁTERO

CALCULA-SE QUE POR CADA BILIÃO DE PARES PARTÍCULA–ANTIPARTÍCULA HAVIA UMA PARTÍCULA EXTRA

Passemos agora ao problema da origem da matéria sob outro ponto de vista. Os cálculos teóricos indicam que a energia cedida pelo ínflaton deveria ter-se transformado num número igual de matéria e antimatéria. Portanto, os choques violentos que caracterizaram o reaquecimento deveriam ter aniquilado por completo ambos os tipos de partículas e gerado apenas grandes quantidades de radiação.

Porque estamos aqui, então? Porque sobreviveu a matéria e não a antimatéria? Haverá grandes quantidades de antimatéria algures? São questões importantes. Se a um teórico fosse pedido que calculasse outro universo com características primordiais idênticas às do nosso, provavelmente diria que seria constituído apenas por radiação. Mas a prova de que toda a matéria não se aniquilou é a nossa própria existência.

Em princípio, calcula-se que por cada bilião de pares partícula–antipartícula havia uma partícula extra, um bárion a mais. Os físicos acreditam que, se entendermos o porquê dessa partícula adicional, poderemos entender porque razão o universo não é composto apenas por fotões. Além disso, se descobrirmos porque é que essa partícula adicional era um bárion, e não um antibárion, poder-se-á responder à pergunta sobre porque o universo é feito de matéria e não de antimatéria. Este problema denomina-se Assimetria Bariónica do Universo (*Baryon Asymmetry of the Universe*, BAU): a diferença entre o número de bárions e o número de antibárions será um simples acidente ou é produto daquilo a que chamamos leis da natureza?



NATURE

Colisão protão–protão na experiência LHCb. Mostra-se a criação de um bárion «beauty», cuja desintegração permitiu observar a violação da simetria CP em partículas de três quarks.

É altura de retomar o conceito de simetria. Já a defini como uma caraterística de um sistema que permanece invariável —recorde o exemplo da rotação das figuras geométricas—, mas também pode ser entendida como um estado homogéneo que perde as suas propriedades diferenciais. Recorrerei a um exemplo claro do livro *Hiperespaço* (1996), de Michio Kaku, para apresentar algumas das facetas mais importantes desta definição.

Para entender a simetria como estado homogéneo, façamos juntos uma experiência na cozinha. Tome um cubo de gelo grande e coloque-o dentro da panela de pressão que eu trouxe. É uma panela muito especial, transparente e, sobretudo, resistente, por isso peço-lhe que a trate bem. Agora, acenda o fogão e coloque a panela sobre a chama; vamos aquecê-la ao máximo. Esta experiência simples ajudá-lo-á a visualizar como os sistemas se podem transformar sob certas condições, um conceito-chave para entender a simetria e a homogeneidade em física e cosmologia.

INSTITUTE OF HIGH ENERGY PHYSICS, CAS

Desintegração de um par bárion–antibárion. A simetria espacial invertida entre matéria e antimatéria segundo as leis físicas.

Antes de um minuto, observaremos que o gelo sofre uma primeira transição de fase: derrete e transforma-se em água líquida, enquanto a temperatura continua a subir. Algum tempo depois, vemos a água entrar em ebulição; as moléculas de água ganham cada vez mais energia até se converterem em vapor — uma segunda transição de fase. Nada de novo; é provável que o leitor já o tenha feito na escola, mas continuemos a aumentar a temperatura para ver o que sucede.

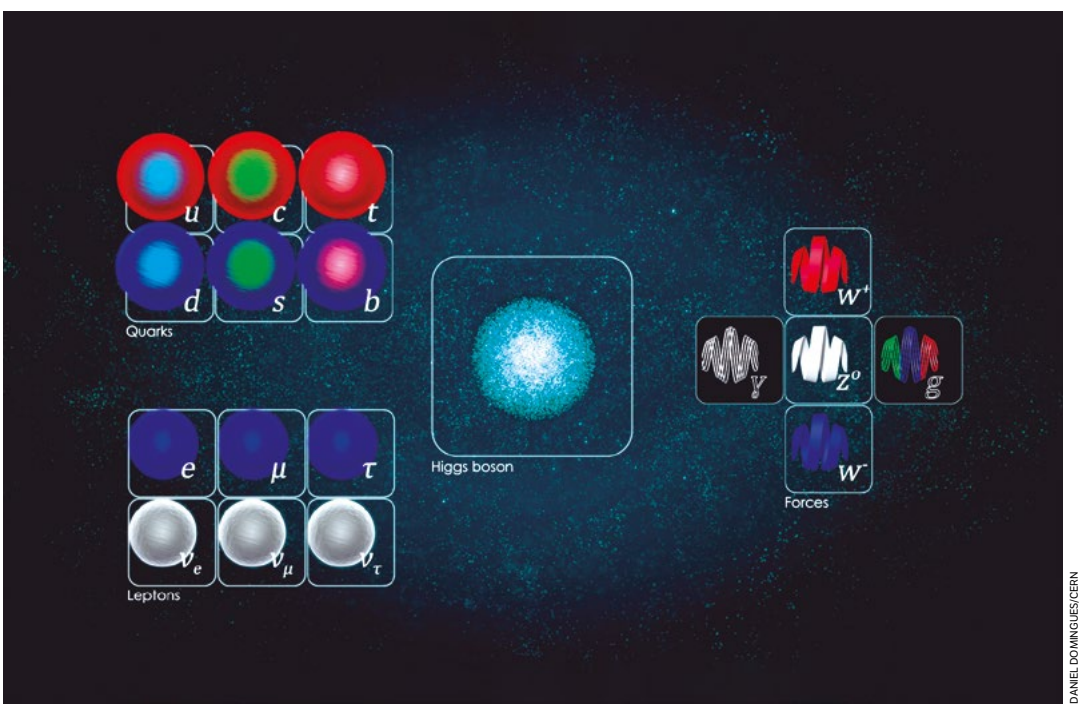
Estou certo de que nunca viu a terceira fase. Aqui, as moléculas de água possuem tanta energia que rompem as suas ligações e dão lugar a átomos individuais de oxigénio e hidrogénio. Recorde que a panela é transparente, por isso podemos ver tudo; está escaldante lá dentro. Depois, a quarta fase ocorre quando atingimos os 3000 ºK. Soa-lhe familiar esta temperatura? Estou certo de que sim. É a mesma temperatura a que foi emitida a LSS. Então, o leitor diz-me: «neste momento os eletrões separam-se dos núcleos atómicos». Tem toda a razão. Esse era o estado do universo 380 000 anos após a grande explosão. Como vamos até aqui? Muito bem: começámos com um cubo de gelo e agora temos, dentro da panela, uma sopa de núcleos atómicos e eletrões. Notável — e ainda não terminámos...

Sei que isto o interessa e, como dizemos no meu país, continuamos a meter-lhe brasa. A panela mágica aquece cada vez mais. Desta vez, teremos de esperar um pouco mais até chegarmos, finalmente, aos mil milhões de ºK — uff! Nesse instante, os núcleos de hidrogénio e oxigénio decompõem-se e os seus

constituintes separam-se. O que temos agora? Uma sopa de protões, neutrões e eletrões — o mesmo estado do universo quando tinha um segundo de vida. Depois dá-se uma sexta mudança de fase quando o interior da minha panela mágica atinge os 10 biliões de ºK. É algo surpreendente e nunca visto desde que o universo nasceu: os protões e neutrões desintegram-se; a força nuclear forte é vencida! E todo o interior da nossa panela é um mar de quarks e leptões. Estamos a ver, na nossa cozinha, o estado do universo instantes após o seu nascimento. Não lhe parece incrível?

Como? Não termina aqui? Não. Garanto-lhe que a minha panela ainda nos pode mostrar mais. Vamos jogar às cartas enquanto esperamos um pouco. Aí está: a panela apitou. O que temos agora? Uma temperatura de mil biliões de ºK. Estamos a observar o que os Nobel da Física de 1979 postularam: a força eletromagnética e a força nuclear fraca uniram-se num conjunto muito mais amplo — a força eletrofraca. Mais tarde, a panela volta a apitar, aos 10^{28} ºK, e aproximamo-nos para observar a oitava mudança de fase: a força eletrofraca unifica-se com a força nuclear forte e conforma a denominada simetria GUT. Alguma vez imaginou que poderíamos fazer tudo isto na sua cozinha?

Agora, a nona e última mudança de fase. Quando o interior da panela alcança 10^{32} ºK, a força restante, a gravidade, unifica-se com a força GUT. É nesse instante que alguns teóricos acreditam que o interior da nossa panela se tornará um autêntico emaranhado de cordas cósmicas. Espere um momento! Começo a notar que o espaço e o tempo se distorcem; oh, não — está a formar-se uma singularidade no interior da panela! Melhor apagar o lume e sair a correr daqui. Apesar do risco — e



DANIEL DOMINGUES/CERN

Os bosões (à direita) transmitem as forças do universo. O Modelo Padrão agrupa estas partículas e forças numa estrutura matemática que explica tudo o que existe.

A FORÇA ELETROMAGNÉTICA E A FORÇA NUCLEAR FRACA UNIRAM-SE NUM CONJUNTO MUITO MAIS AMPLO

de pôr a sua cozinha em perigo —, espero que isto tenha sido suficientemente interessante para me voltar a convidar a fazer experiências em sua casa. Garanto que não há nenhuma mais extrema do que esta.

Este exemplo ilustra a estreita relação entre a temperatura e as diferentes fases da evolução do cosmos. Desta vez fomos das temperaturas baixas para as altas, mas, se o fizermos ao contrário, simulando as condições da grande explosão, perceberemos que cada uma dessas mudanças de fase é o que os físicos chamam de rutura de uma simetria. Os elementos indiferenciados, a começar pelo mar de cordas, passam a condensar-se em campos e partículas diferenciáveis, como os diversos átomos ou moléculas que temos no final. É precisamente este processo que permite a existência das interações fundamentais. Agora, talvez se entenda melhor as mudanças de fase da inflação para o reaquecimento: à medida que a temperatura diminui, nascem novas forças e interações. Primeira conclusão: as transições de fase são geralmente acompanhadas pela rutura de uma simetria.

Vejamos agora uma situação mais familiar para dar outro exemplo de simetria, entendida desta vez como uma caraterística de um sistema que permanece invariável. Aproveitando as promoções de verão, comprou a cama de 2 x 2 m que sempre desejou. Levou-a para casa e montou-a sem grande dificuldade. Mas, no momento de colocar o lençol, dá-se conta do erro: como a cama agora é maior, deveria ter comprado lençóis novos. O que tem fica-lhe curto. Definitivamente cansado e sem vontade de voltar às compras, decide tentar ajustar o lençol antigo à nova cama. Com algum esforço, consegue finalmente prender os elásticos do lençol em cada um dos quatro cantos. Dadas as dimensões da cama, se rodar o colchão 90º, 180º, 270º e 360º, apercebe-se de que a sua aparência não muda. Amigo, o seu colchão tem uma simetria rotacional de 90º! Ou seja, se o colchão for rodado em múltiplos de 90 graus, não conseguirá diferenciar um estado de rotação de outro.

Não se esqueça, porém, de que o lençol não foi feito para um colchão tão grande e, apesar das aparências, está sujeito a uma tensão intensa — um estado de falso vácuo. Quando menos espera, os elásticos saltam de dois cantos e o lençol enrodilha-se; o estado simétrico do seu colchão quebra-se porque o lençol tentou regressar ao seu estado de verdadeiro vácuo. Esta experiência fá-lo-á recordar para sempre que, apesar de observarmos um estado simétrico, quando se força um objeto a uma posição que não é natural para ele, esse estado tende a desaparecer. Quando o lençol se enrodilha, constata que a simetria se rompeu, porque ao rodar o colchão percebe que, a cada giro de 90º, já não parece igual. Segunda conclusão: um estado de máxima simetria — falso vácuo — é frequentemente instável.

Passemos agora à BAU. Embora hoje a assimetria entre bárions e antibárions seja grande, no universo primitivo o número de ambos os grupos estava bastante equi-

librado. Por alguma razão, as partículas prevaleceram e geraram uma diferença que não existira antes — um fenómeno denominado bariogénese. A BAU pode denotar-se matematicamente assim:

$$\eta = \frac{n_{\text{Matéria}} - n_{\text{Antimatéria}} \ \textit{(excesso de bárions)}}{n_{\gamma} \ \textit{(fotões)}} = 6x10^{-10}$$

A densidade de bárions calcula-se em 0,2 m^3 — volume no qual também se podem encontrar 400 milhões de fotões do CMB. Portanto, o quociente entre ambos os valores é de 6 x 10^{-10}, um valor que se manteve constante apesar da expansão do universo. Um quociente próximo de 1 implicaria a existência de quantidades semelhantes de bárions e fotões.

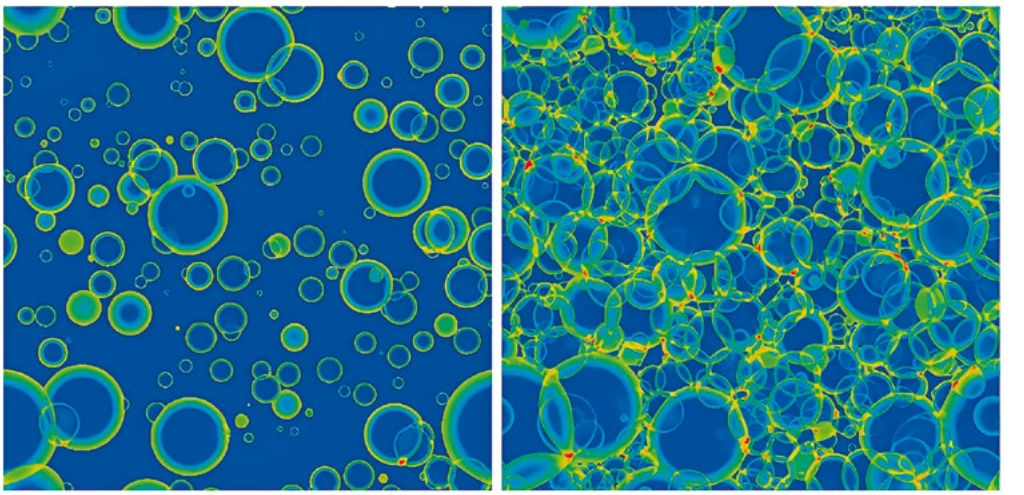
O físico nuclear russo Andrei Sakharov (1921-1989), Nobel da Paz em 1975 pela sua «luta em prol dos direitos humanos, recusa de armas e cooperação entre todas as nações», foi quem colocou os cientistas na pista da BAU. Sakharov considerou que, após um estado inicial de matéria e antimatéria superdenso, a BAU poderia ter surgido dinamicamente durante a expansão do universo, quando as partículas, a energia, o parâmetro de Hubble e as temperaturas eram da ordem das unidades gravitacionais.

Analisando, então, certas partículas e as respetivas antipartículas, Sakharov, em conjunto com o físico teórico russo Vadim Alexeevich Kuzmin (1937-2015), postulou três condições especiais para que ocorresse a bariogénese. Em primeiro lugar, o número bariónico não deveria conservar-se. Sei que isto lhe parece óbvio, mas na realidade não é. Em segundo, a simetria CPT deve ser violada, recorda? Aquela que Anderson observou no pósitron em relação ao eletrão. E, por fim, tem de haver uma perda do equilíbrio termodinâmico.

Estima-se que estes três fenómenos não poderiam ter sucedido antes ou durante a inflação, pelo que a bariogénese deve ter ocorrido durante o reaquecimento, cerca de 10^{-12} s após a grande explosão. Hoje, o Modelo Padrão (SM) dá respaldo a estas condições. No entanto, crê-se que só predominam durante um breve período em que se formam bolhas de assimetria bariónica. São zonas onde predominam os bárions nalgumas e os antibárions noutras. Estas bolhas representam microcosmos em que as «regras» parecem inverter-se — um fenómeno que, embora nos possa parecer estranho, é fundamental para entender como a simetria e a assimetria coexistem no nosso universo.

Exploremos um pouco a primeira condição. Considere-se que a matéria não é estática, mas transforma-se no interior das estrelas, em explosões cósmicas e noutros fenómenos. Por exemplo, um protão desintegra-se num neutrão, num positrão e num neutrino. Embora as populações de partículas mudem — os protões diminuem e os neutrinos aumentam —, a população bariónica total não muda porque um protão é substituído por um neutrão. Noutro contexto, bárions e

A DESINTEGRAÇÃO DE UMA PARTÍCULA PESADA X PODE GERAR MAIS QUARKS DO QUE ANTIQUARKS



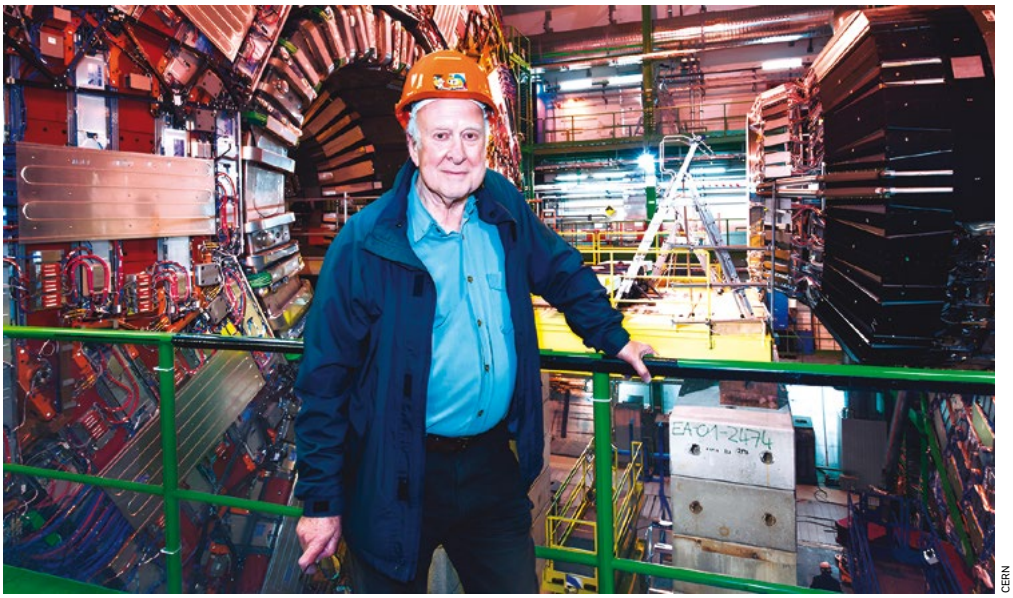
JCAP

Simulação da formação e expansão de bolhas do campo de Higgs durante a transição de fase do universo primitivo.

antibárions podem ser criados e aniquilados aos pares, mas o excesso de bárions sobre antibárions mantém-se constante — condição conhecida como número bariónico. De momento, os cientistas não conhecem qualquer fenómeno ou condição que quebre o número bariónico, pelo que se presume que esta propriedade se manteve constante ao longo de toda a história cósmica. O mesmo ocorre com o número leptónico.

A transgressão do número bariónico proposta por Sakharov tem, então, dois elementos. Primeiro, em algum momento da história cósmica não existiam bárions: o número bariónico era zero. Mas, quando passaram a existir, o número bariónico «quebrou-se» porque passou de zero a um valor distinto. Se o número bariónico se conservasse, não haveria bárions. Mais tarde, o número bariónico violou-se pela segunda vez, quando surgiu esse bárion a mais por cada bilião de antibárions. Os físicos não sabem ao certo como ocorreu o primeiro fenómeno. Já foi dito que a física dos campos escalares a altíssimas temperaturas é desconhecida e, portanto, a forma como o inflaton cedeu a sua energia para originar a fase de reaquecimento permanece pouco clara. Pelo contrário, a segunda parte da história é um pouco mais fácil de desenhar e os físicos consideram que dois fenómenos são a chave.

Primeiro, a desintegração de uma partícula pesada X pode gerar mais quarks do que antiquarks. A mecânica quântica permite supor que há a possibilidade de que, em 51% das vezes, X siga um processo de desintegração, enquanto a sua antipartícula, $\overline{x}$, o faça em 49% das vezes. Esta assimetria gerará, sem dúvida, um excesso de bárions. Segundo, quando o universo arrefeceu até T ~ 1 GeV, o processo $2\gamma \rightarrow p + p$ — fotões que se convertem em protões e antiprotões — fica energeticamente bloqueado. Ao diminuir a temperatura, também decresce a energia disponível para desintegrar partículas, enquanto o processo inverso, $p + p \rightarrow 2\gamma$ — protões e antiprotões a aniquilarem-se para formar fotões —, prevalece. Deste modo, mais uma vez, as pequenas flutuações quânticas contribuíram para a BAU.



CERN

O físico Peter Higgs durante a sua visita à experiência CMS no Grande Colisor de Hadrões (*CERN*), abril de 2008.

Por outro lado, considera-se que a segunda condição, que é a rutura da simetria CPT (carga, paridade e tempo), se dá através da interação fraca. Esta condição é única, pois pode transformar um tipo de partícula noutro — um processo essencial na formação das caraterísticas do universo. A primeira evidência da rutura da simetria CPT surgiu em 1957, com o estudo do cobalto-60, um isótopo radioativo. Este isótopo sofre um processo de desintegração, em média de cinco anos, conhecido como decaimento beta, que o transforma num isótopo estável, o níquel-60. Em termos simples, durante o decaimento beta, um neutrão no núcleo do átomo de cobalto-60 transforma-se num protão, emitindo um eletrão e um antineutrino. Esta transformação é uma manifestação da interação fraca e representa uma violação da simetria CPT, já que a partícula original (neutrão) e as partículas finais (protão, eletrão e antineutrino) não são idênticas, implicando uma alteração de carga, paridade e tempo.

Finalmente, a última condição, a perda do equilíbrio térmico, não é outra coisa senão a seta do tempo. O CMB é o corpo negro mais perfeito medido na natureza e permite-nos determinar que o universo se encontra quase em equilíbrio térmico absoluto a 2,725 ± 0,02 °K. As teorias sobre a fase da nucleossíntese estimam que, para que se produzisse a BAU, o universo teve de atingir o seu equilíbrio térmico 2–3 minutos após a grande explosão e perdê-lo graças aos máximons que, segundo Sakharov, são partículas com massa não superior a uma unidade gravitacional $M_o = 2 \times 10^{-5}$ g.

Os físicos postularam vários processos que poderiam transportar todas, ou parte, das condições para a BAU: a bariogénese eletrofraca, a leptogénese, a produção de campos escalares e dinâmicas da escala de Planck, e outros, como a transição de fase quântica, que não requer violação do número bariónico nem da CPT. Os especialistas não cessam de trabalhar nisso.

Por outro lado, alguns teóricos consideram que a BAU não ocorreu realmente, mas que algum processo ainda desconhecido separou a matéria da antimatéria no universo primordial. Contudo, a ausência de raios gama no espaço intergaláctico, produto das colisões entre matéria e antimatéria, tem vindo a afastar cada vez mais a fronteira desta hipótese. No princípio, estimava-se que a antigaláxia mais próxima deveria estar, pelo menos, a 10 Mpc. Depois, a estimativa cresceu para 1 Gpc e, finalmente, considerou-se que, se existisse alguma galáxia composta de antimatéria, esta deveria encontrar-se para lá dos limites do universo observável. Se houvesse altas concentrações de antimatéria na nossa região, deveriam deixar um fundo de aniquilação de raios gama, que não foi detetado. Do mesmo modo, os padrões do CMB não mostram qualquer indício de que tenha ocorrido uma separação entre matéria e antimatéria após a recombinação.

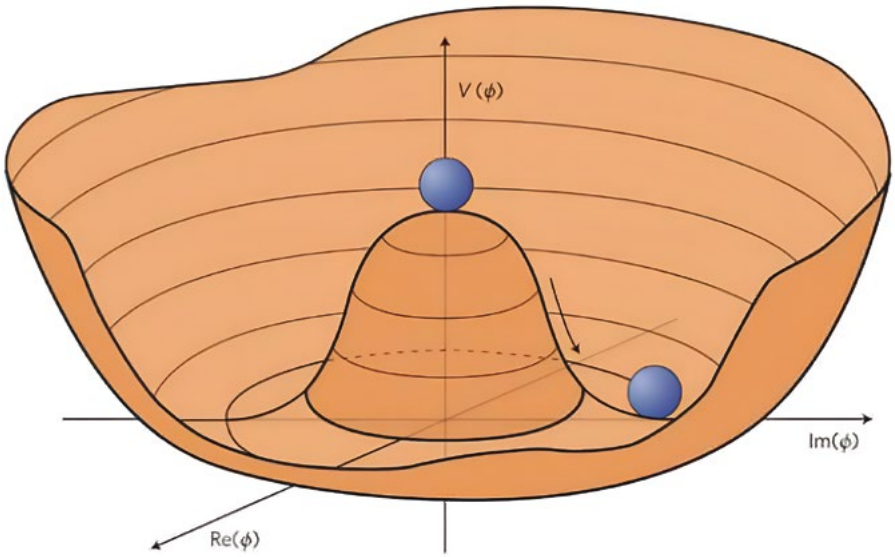
As antipartículas que encontramos aqui na Terra não são resíduos do Big Bang, mas sim produto de processos secundários, como as colisões dos raios cósmicos — partículas de alta energia provenientes do espaço — com a atmosfera terrestre. Além disso, outros eventos extremamente energéticos no cosmos, como as explosões de supernovas — a morte violenta de uma estrela — e as explosões de raios gama — o fenómeno mais brilhante e energético conhecido no universo — também podem gerar antipartículas que chegam ao nosso planeta. No nosso contexto habitual, nunca detetámos naturalmente partículas de antimatéria mais complexas, como um anti-hidrogénio ou um antideutério. No entanto, surgiu recentemente uma descoberta intrigante: a deteção de positrões, que são as antipartículas dos eletrões, no espetro de micro-ondas do Sol. Este achado lembra-nos que ainda temos muito por descobrir e compreender na física de partículas.

Em suma, apesar de existirem boas ideias sobre as origens da BAU, não há conclusões definitivas e os cientistas prosseguem a tarefa, teórica e experimental, de explicar porque vivemos num universo de matéria. Por ora, pode afirmar-se que o estranho acontecimento ocorrido a 30 de junho de 1908 em Tunguska, na Sibéria, atribuído por alguns a um «meteorito» de antimatéria, é menos provável do que a hipótese de choque de uma nave extraterrestre.

PORQUE É QUE OS ELEFANTES PESAM?

Chegamos agora ao problema da massa, da sua origem e do valor específico para cada corpo. Esta propriedade parece-nos uma caraterística óbvia da matéria, tanto que poderíamos pensar que não requer explicação. Se há matéria, tem de haver massa — as coisas pesam! —, nada de estranho nisso. Porque pesa mais uma baleia do que uma pessoa? A resposta óbvia é «porque tem mais massa». E então, o que é a massa? «É a quantidade de matéria que um corpo possui». O que mais há a saber? Caro leitor, saiba que explicar porque os objetos pesam, ou porque têm massa, não é tarefa fácil.

RECENTEMENTE SURGIU UMA DESCOBERTA INTRIGANTE: A DETEÇÃO DE POSITRÕES



ELLIS/M NEUBAUER

O «sombrero mexicano» de Higgs. Enquanto campos como o eletromagnético ou o do inflaton têm o seu ponto de energia mais baixo num vale, o campo de Higgs tem esse espaço ocupado por uma colina. Por essa razão, o seu ponto mais baixo é uma posição na base da colina — não no centro —, tornando o seu valor diferente de zero. Para passar a zero, requer energia que lhe permita trepar até ao centro da colina.

Nos seus *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural* (1687), Isaac Newton (1642-1727) define a massa como «a quantidade de matéria é a medida da mesma que nasce da sua densidade e do seu volume conjuntamente». Precisamente, este conceito está incluído numa das suas equações mais famosas, $F = ma$, que decerto aprendeu na escola. Vista assim, a massa é uma propriedade irredutível e emergente da matéria, além de ser um conceito instrumental para exprimir a existência de matéria. Mas, tal como Newton não ofereceu uma explicação sobre a natureza da gravidade, também não o fez sobre a massa. Por sua vez, o princípio de Mach indica que a massa é um parâmetro derivado das interações gravitacionais que mede a resistência de um objeto a mudar de estado ou movimento. Contudo, para compatibilizar esta ideia com a relatividade, é necessário supor a existência de um campo que ofereça resistência aos objetos que possuem massa.

A relatividade estabelece que as partículas sem massa, como o fotão, são as únicas que podem atingir c. No entanto, Einstein deu-nos a conhecer que a massa é uma propriedade dinâmica e permutável com a energia. A sua famosa fórmula $E = mc^2$ indica-nos que um corpo que possua energia também possui massa — e, por certo, o fotão possui-a. Assim, uma forma mais adequada de exprimir esta ideia é dizer que o fotão não tem massa em repouso, enquanto partículas como o eletrão podem estar nesse estado (em repouso). Pode dizer-se, então, que o estado de energia mais baixo do fotão é viajar a c. Pelo contrário, partículas que têm massa em repouso, como o nosso amigo eletrão, nunca alcançarão a velocidade da luz.

Em novembro de 1961, a *Physical Review* publicou um artigo de Carl Brans e Robert Dicke que propunha um novo esquema para entender a origem da massa.

Com base na constante gravitacional que conhecemos das equações de Newton, estes físicos sustentaram que G podia ser substancialmente modificada para se ajustar à relatividade. Para o conseguir, introduziram ϕ, um campo inversamente proporcional a G que a substituía sob a forma $1/\phi$ nas equações relativistas. Isto permitia que o ϕ impregnasse todo o espaço e determinasse algumas propriedades da matéria — a massa segundo o princípio de Mach.

Posteriormente, o físico teórico inglês Peter Higgs (1929-2024) desenvolveu uma formulação matemática que continha campos escalares e uma rutura espontânea de simetria. Deste modo, postulou que a massa era produto da interação de todas as partículas do universo com ϕ, um campo escalar que surgiu graças a uma mudança de fase no universo primordial. A sua teoria sustenta que, nos instantes posteriores ao reaquecimento, as partículas elementares se moviam livremente à velocidade da luz. No entanto, quando ϕ assentou no seu estado de energia mais baixo, deu-se uma rutura de simetria que o transformou numa espécie de melaço que oferecia resistência ao movimento das partículas. E, se essa resistência fez com que as partículas diminuíssem a sua velocidade, para onde foi a energia cinética que perdiam? Pense um pouco... mais um pouco... Já sabe? Muito bem: a energia converteu-se em massa.

Os trabalhos de Brans–Dicke e Higgs foram publicados quase em simultâneo na Physical Review e contam-se hoje entre os artigos de física mais citados de sempre. Ambos explicavam, por vias alternativas, a origem da massa por meio de um campo escalar que interage com a matéria. Desde então, grande parte dos esforços da física de partículas tem-se dirigido a entender as propriedades e simetrias desse campo e das partículas que o transmitem.

Agora, peço-lhe que tenha presente o «zoológico» de partículas apresentado no início do capítulo e se detenha em duas delas: os bosões W e Z, responsáveis pela força nuclear fraca. A este par chama-se também bosões *gauge* porque mantêm a simetria *gauge*, uma das principais no SM. Muito bem: a primeira pista sobre o campo proposto por Higgs é a teoria eletrofraca, que unifica os fotões e os bosões W e Z. Como os fotões carecem de massa em repouso, os cálculos indicam que a força eletromagnética tem um alcance infinito que decresce com a distância. Já a força nuclear fraca atua apenas no núcleo atómico e, ao contrário do eletromagnetismo, tem alcance limitado. Isto traduz-se em que as partículas que transmitem a força fraca devem ser massivas e não podem mover-se à velocidade da luz.

Então, os físicos perguntaram-se: se podemos unificar a força eletromagnética e a nuclear fraca numa única teoria, o que faz com que os bosões W e Z adquiram massa e os fotões não? A resposta dada por Higgs há 50 anos foi que um campo escalar como ϕ produz uma rutura espontânea da simetria *gauge* que dissolve a escala de energia eletrofraca e gera massas para os bosões W e Z e para os fermiões. Para sustentar a sua teoria, previu que, nos colisores de partículas, deveria ser detetado

EINSTEIN DEU-NOS A CONHECER QUE A MASSA É UMA PROPRIEDADE DINÂMICA E PERMUTÁVEL COM A ENERGIA

o bosão deste campo a uma energia de ~100 GeV – 1 TeV: o há muito procurado bosão de Higgs, o santo graal do SM.

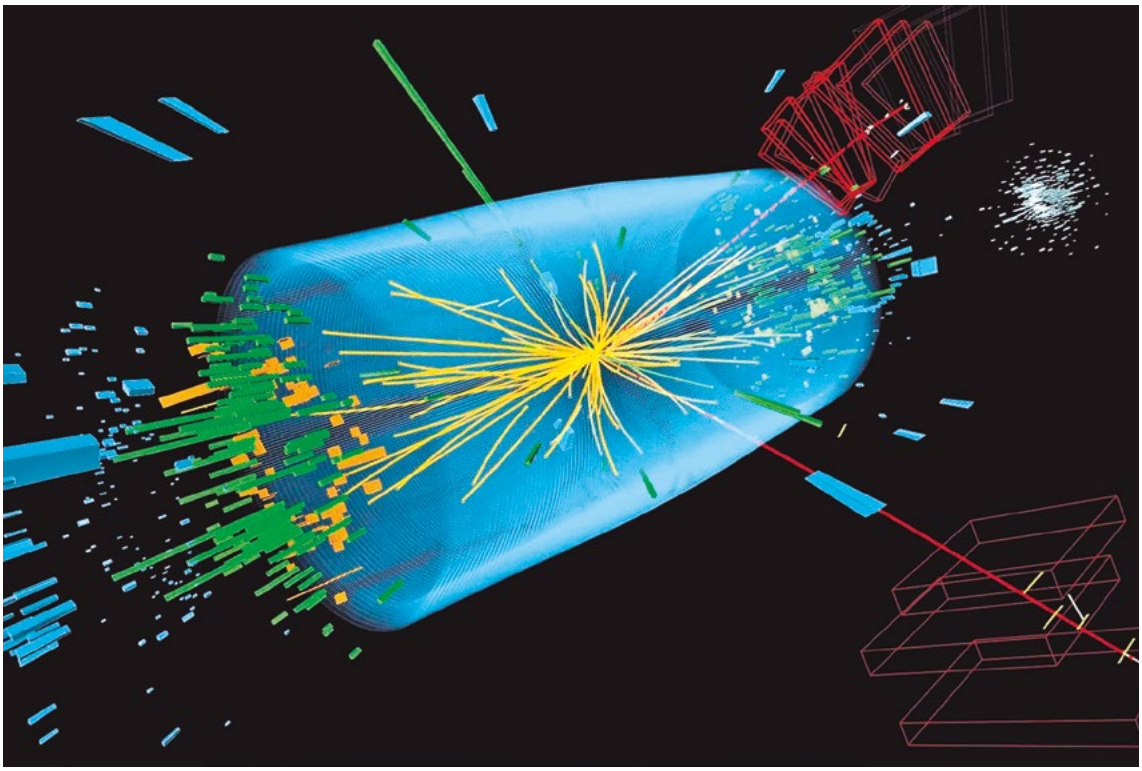
Volte a convidar-me a sua casa para fazermos uma experiência que o ajude a entender melhor o campo de Higgs. Vamos agora usar a sua nova piscina, aquela que acabou de construir nas traseiras. Mas espere, não a encha já; faremos primeiro um exercício. Entre na piscina vazia. Agora, corra alguns segundos por todo o espaço. Sente-se confortável, não é? Pode correr livremente por onde quiser. Fique aí, não saia. De seguida, vou abrir a mangueira para começar a encher a piscina, enquanto continua a correr. Vejo agora que a água lhe chega aos joelhos e que já não corre tão depressa como antes. «A água atrapalha-me a corrida; custa-me mover-me; as pernas pesam-me quando as ergo», exclama, algo irritado. Excelente: acabou de perceber o que aconteceu às partículas quando o campo de Higgs assentou no seu ponto de energia mais baixo. A sua piscina é o espaço-tempo, a água é o campo de Higgs e você é qualquer partícula no espaço — uma equação simples. Terminemos de a encher e, por favor, vá buscar uns refrescos.

Analogamente, no princípio todos os campos da natureza estavam unificados. À medida que a temperatura desceu, foram-se rompendo simetrias e os campos começaram a separar-se. O campo do inflaton «soltou-se» e, depois, ocorreu o reaquecimento que criou partículas que se moviam à velocidade da luz. Quando o universo atingiu 10^{15} °K, perdeu-se a simetria *gauge* e surgiu o campo de Higgs, que dotou as partículas de massa em proporção à intensidade do campo multiplicada pela intensidade da interação. Até ao momento, este mecanismo teórico funciona muito bem para explicar a massa de todas as partículas elementares conhecidas e poderá também ter implicações na BAU que explorámos anteriormente.

O campo de Higgs é um campo quântico, cujos processos energéticos são semelhantes aos de outros campos escalares. Mas, ao contrário de campos como o do ínflaton, o valor de energia mais baixo para o campo de Higgs é diferente de zero. Recorde a bola a descer a encosta. Enquanto alguns campos se instalam no fundo do vale, a encosta de ϕ tem uma pequena colina no centro, de modo que o seu valor mais baixo corresponde a uma posição em torno da colina circular, não ao centro do vale. Em redor dessa colina, tal como o ínflaton, o campo de Higgs sofrerá uma condensação de Bose–Einstein e gerará uma rutura de simetria.

Para que o campo de Higgs tivesse um valor nulo e não dotasse as partículas de massa, teríamos de lhe injetar energia para que subisse a encosta e gerasse outra rutura de simetria. Contudo, sugiro que não o tentemos — nem lhe ocorra fazê-lo em casa! Um eletrão sem massa jamais poderia ser capturado por um protão sem massa para formar átomos. Do mesmo modo, se os bosões W e Z carecessem de massa, gerariam uma interação fraca tão intensa quanto a eletromagnética.

FRANÇOIS ENGLERT E PETER HIGGS FORAM GALARDOADOS COM O NOBEL DA FÍSICA EM 2013



CERN/ATLAS

Deteção do bosão de Higgs no *CMS* (2012). O rasto das partículas (linhas verdes e vermelhas) resultantes confirmou a existência do Higgs.

Em conclusão, o universo tal como o conhecemos mudaria radicalmente e nós, feitos de átomos, desintegrar-nos-íamos no instante.

Para completar o quadro, em julho de 2012, recorrendo ao detetor ATLAS, os físicos da Organização Europeia para a Investigação Nuclear (*European Organization for Nuclear Research*, CERN), em Genebra, Suíça, anunciaram a deteção de uma partícula a 125 GeV, em consonância com o hipotetizado e esperado bosão de Higgs. Sem dúvida, esta descoberta é um dos feitos mais importantes da física e permite concluir que as propostas do SM sobre o universo vão no bom caminho. Por este facto, o físico teórico belga François Englert (1932-) e Peter Higgs foram galardoados com o Nobel da Física em 2013 «pela descoberta teórica de um mecanismo que contribui para a nossa compreensão da origem da massa das partículas subatómicas e que foi recentemente confirmado através da descoberta da partícula fundamental prevista, pelas experiências ATLAS e CMS no Grande Colisor de Hadrões do CERN».

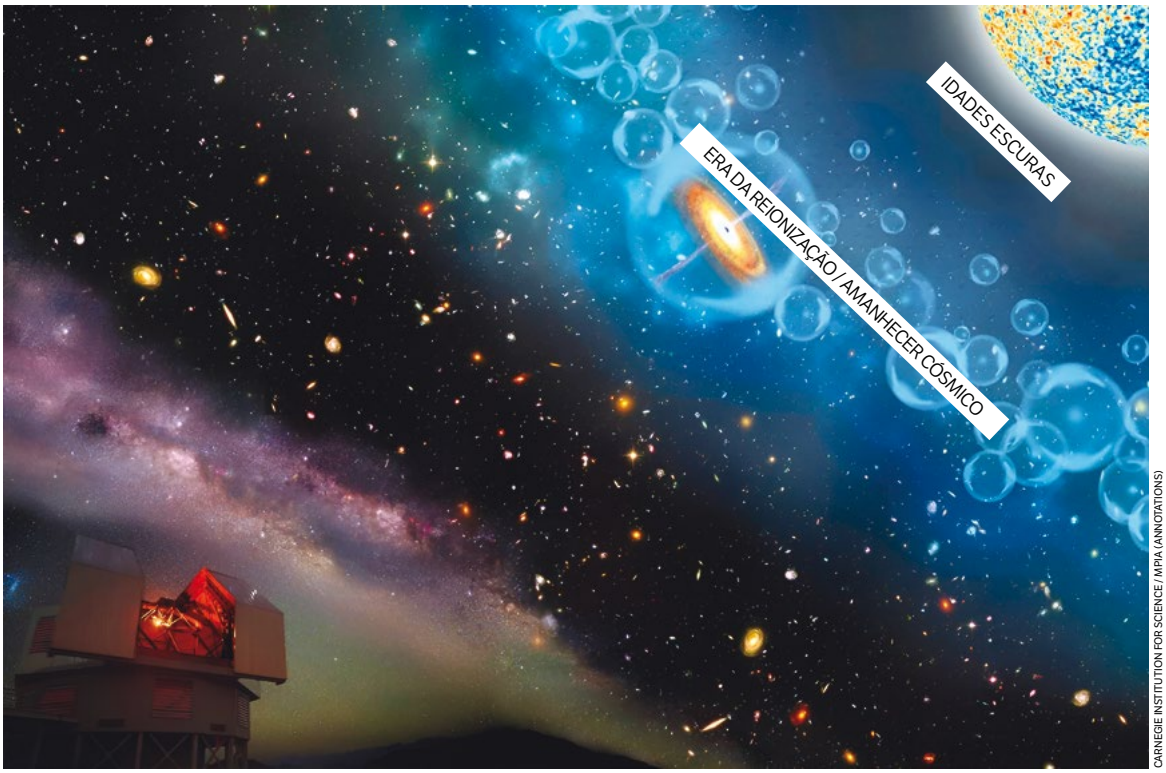
Os avanços que venham a surgir nos próximos anos, especialmente com as experiências do Grande Colisor de Hadrões (*Large Hadron Collider*, LHC) no CERN, poderão complementar ou modificar o alcance deste achado e do SM. Em particular, há teorias que postulam a existência de diferentes tipos de bosões de Higgs e outras que incluem supersimetrias — como a teoria das cordas — que esperam que a caracterização completa deste novo bosão permita sustentar a existência de outra família de partículas muito mais pesadas do que as que conhecemos. ■

Os planos obscuros da Criação

A CMB fornece-nos informação detalhada sobre a composição e os processos primordiais do Universo quando este era um recém-nascido e iniciava o seu ciclo evolutivo. No entanto, a página seguinte do álbum da história cósmica está repleta de fotografias de uma criança já a dar os primeiros passos, mas ignoramos por completo como aprendeu a fazê-lo. Há uma região no espaço, na história do Universo, que permanece escura e inexplorada pelos astrónomos. Desde a emissão da LSS, 380 000 anos após a grande explosão, até cerca de mil milhões de anos mais tarde, quando se formaram as primeiras estrelas e galáxias, o Universo era um lugar escuro onde ainda não existiam fontes luminosas. Nessa altura, o nosso lar era um mar de átomos relativamente frios que não emitiam quantidades significativas de radiação, pois a matéria fria não brilha.

Indagar o que ocorreu nesse interlúdio escuro é um dos quebra-cabeças mais importantes e complexos da cosmologia e da astronomia atuais. Neste capítulo, exploraremos como é que os cientistas se têm arranjado para ver na escuridão e escavar nas trevas do Universo primitivo.

SHUTTERSTOCK



A imagem recria a Era da Reionização, quando a luz das primeiras estrelas e buracos negros começou a dissipar a «névoa» de hidrogénio que enchia o Universo primitivo.

A história do Universo precoce pode dividir-se em fases. A primeira, os ~30 000 anos que se seguiram ao Big Bang, é conhecida como a era da radiação. Nesta fase, a expansão do Universo foi dominada pelos efeitos da pressão da radiação e pela ação das partículas energéticas que, a altas temperaturas, têm efeitos semelhantes aos da luz.

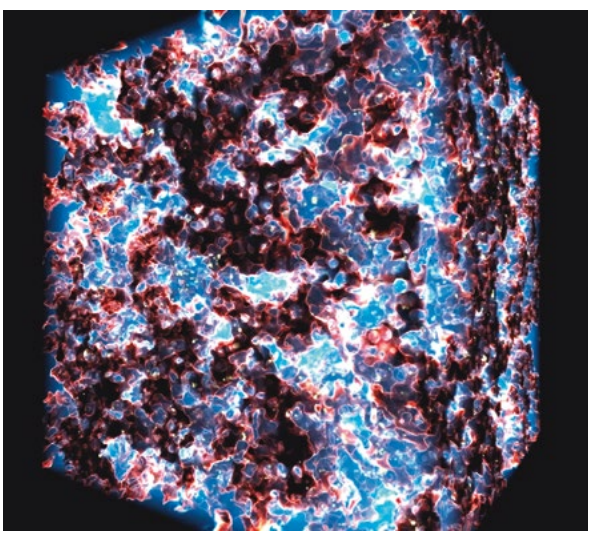
Posteriormente, com a queda da temperatura, a balança inclinou-se para o outro lado e teve início a era da matéria. Dado que a densidade da radiação decresce mais rapidamente do que a densidade da matéria num volume em expansão, houve um ponto em que os efeitos da pressão da radiação se tornaram desprezáveis na expansão. Desde então, apesar de a luz continuar a viajar por todo o espaço, é a massa, e portanto a gravidade, que determina a estrutura e a maior parte dos fenómenos cósmicos.

Por sua vez, a era da matéria acolhe duas etapas da evolução do Universo: a Idade Escura (*dark age*) e a Reionização (*Epoch of Reionization*, EoR). A Idade Escura é um período de ~1000 Ma, que abrange o tempo desde a recombinação —z ~1100— até à formação das primeiras estrelas e galáxias —z ~6—. Aqui, o gás estendia-se uniformemente ao longo do espaço e mal começava a aglomerar-se graças às diminutas flutuações quânticas de densidade que deixaram algumas regiões mais densas do que outras após a inflação. Como não havia estrelas, nesta fase o Universo permanecia escuro e o hidrogénio estava tão frio que as nuvens deste gás também não emitiam luz como o fazem atualmente.

CHAMA-SE REIONIZAÇÃO PORQUE FOI A SEGUNDA VEZ QUE O UNIVERSO SE IONIZOU

Em segundo lugar, a EoR é a fase final da Idade Escura, quando se formaram as primeiras estrelas e o Universo começou a brilhar. Chama-se reionização porque foi a segunda vez que o Universo se ionizou; antes da emissão da LSS encontrava-se ionizado, mas, com uma temperatura abaixo de 3000 ºK, os núcleos atómicos capturaram os eletrões. Depois, na EoR, o gás juntou-se em quantidade suficiente, aqueceu novamente, ionizou-se e iniciou reações nucleares que formaram estrelas.

Há cerca de duas décadas, os modelos cosmológicos e a observação de quasares a z ~6,5 estimavam que o meio intergalático se tinha reionizado por completo mil milhões de anos após a grande explosão. Considerava-se que as principais fontes de reionização do gás tinham sido a luz emitida pelas primeiras estrelas e galáxias e a queda de hidrogénio nos buracos negros primordiais. Contudo, a exploração, na última década, de quasares a z > 6, em espectros distintos do visível, parece sugerir que o Universo já estava reionizado quando tinha uma idade de ~100 Ma (z ~15-30), uma etapa pré-galática, cerca de 900 Ma antes do que se pensava. Do mesmo modo, o WMAP e o Planck registaram uma ligeira polarização da CMB que não pode ocorrer quando os átomos são neutros, o que sugere que o Universo estava reionizado quando tinha ~200 Ma — z ~11.



M. ALVAREZ, R. KAEHLER, AND T. ABEL

Representação da transição de gás neutro para ionizado. A radiação UV impulsiona a expansão de bolhas ionizadas através do meio intergalático.

Em suma, existe então uma fase para a qual não possuímos qualquer registo observacional —a Idade Escura— e outra em que é possível detetar a primeira radiação proveniente das estrelas recém-formadas e do gás intergalático. Porém, a EoR revelou-se um processo muito mais complexo do que os cosmólogos imaginaram a princípio. Quais são as fontes energéticas que ocasionaram o aquecimento do hidrogénio? Ter-se-ão formado as estrelas antes do que se pensava? Como estavam organizadas as sementes que deram lugar às estruturas que hoje observamos? Embora a resposta se encontre oculta por um véu escuro de mil milhões de anos, nunca duvide, prezado leitor, do engenho humano.

APENAS 21 CENTÍMETROS PARA VER NA ESCURIDÃO

No início do século XX, os físicos Ralph Kronig (1904-1995), alemão, e George Uhlenbeck (1900-1988), neerlandês, descobriram o spin, uma propriedade que denota o momento angular intrínseco das partículas subatómicas. O spin aponta apenas em duas direções, convencionalmente denominadas para cima e para baixo. Num dado momento, um átomo de hidrogénio pode ter os spins do seu protão e do seu eletrão a apontar na mesma direção ou, noutros casos, em sentidos opostos.

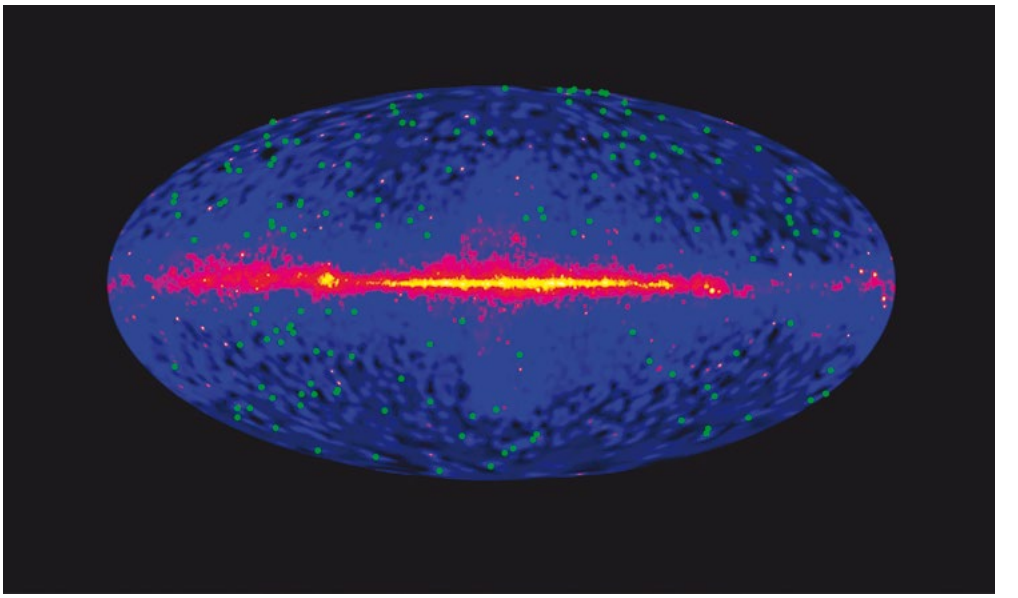
Abraham Loeb (1962-), cosmólogo da Universidade de Harvard amplamente reconhecido pelo seu trabalho sobre o Universo primordial, encontrou uma aplicação elegante para este fenómeno. Advertiu que, quando o spin de ambas as partículas se encontra a apontar na mesma direção, pode saltar para apontar na direção oposta —por efeitos quânticos ou por colisões entre átomos—, e o átomo experimenta uma perda de energia que se traduz na emissão de um fotão com um comprimento de onda de 21 cm, correspondente ao espetro das ondas de rádio.

Loeb propôs então que, se a matéria fria emite esta radiação específica e detetável, seria possível construir um mapa detalhado da Idade Escura e da EoR que permitiria conhecer, com elevada precisão, a configuração do Universo primordial e as suas primeiras estruturas. Em outras palavras, este cosmólogo encontrou a forma de observar na escuridão.

Atualmente, a CMB é a principal fonte de informação sobre o Universo primordial, mas alguns cosmólogos acreditam que a sua hegemonia não durará muito. Espera-se que o mapa da luz de fundo extragalática (*Extragalactic Background Light*, EBL), que se poderá construir com a recolha da radiação de 21 cm, redefina a nossa ideia sobre a evolução do Universo. Enquanto a CMB nos mostra uma única fotografia das sementes do cosmos, a EBL oferecer-nos-á um vídeo completo da evolução dessas sementes ao longo de mil milhões de anos.

KRIS SNIBBE / HARVARD

Abraham Loeb, uma das figuras da astrofísica moderna, especialmente conhecido pelo seu papel como diretor do Projeto Galileo na Universidade de Harvard.



NASA/ DOE/ FERMI LAT COLLABORATION

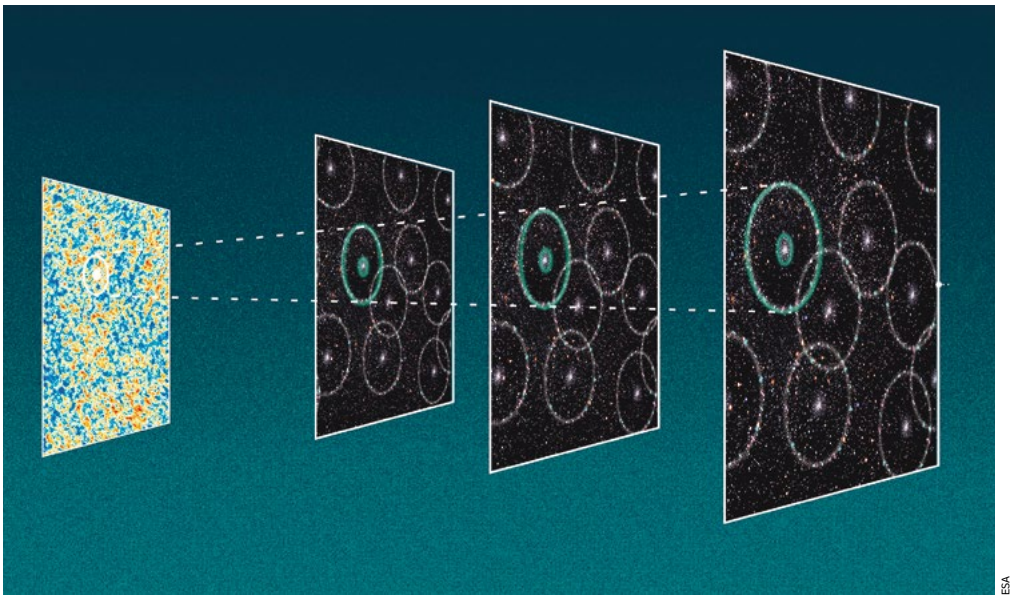
Gráfico que mostra a localização de 150 blazares (pontos verdes) utilizados no estudo da luz de fundo extragalática.

A característica mais importante desta cartografia é que será um mapa tridimensional, enquanto a CMB é um mapa bidimensional. Como a recombinação ocorreu num só instante, os fotões da LSS provêm de um único ponto de espaço-tempo na evolução cósmica, ao passo que os fotões de 21 cm serão recolhidos em toda a faixa de mil milhões de anos que durou a Idade Escura. Deste modo, a radiação provirá de diferentes momentos-pontos do espaço.

Adicionalmente, a CMB não é completamente transparente, dado que a recombinação não ocorreu exatamente ao mesmo tempo em todos os pontos, mas de forma gradual, tal como se dissipa o fumo ou o nevoeiro. Por esta razão, a radiação difundiu-se a curtas distâncias e obscureceu algumas das impressões mais finas. Pelo contrário, a radiação proveniente da Idade Escura não está ensombrada pela difusão fotónica, tendo tido oportunidade de se propagar livremente pelo Universo em escalas abaixo da massa de Jeans.

Por outro lado, estima-se que a EBL também possa oferecer um mapa dos sinais ultravioleta e de raios X do meio intergalático, já reionizado pelo amanhecer das primeiras galáxias. Adicionalmente, os cálculos estimam que os raios ultravioleta do meio intergalático elevariam a frequência de onda do sinal de 21 cm para 2,84 MHz (λ= 100), no intervalo entre z = ~1100 - 500, pelo que a deteção desta radiação primordial é também útil para caracterizar e diferenciar as emissões do gás frio.

A CMB É A PRINCIPAL FONTE DE INFORMAÇÃO DO UNIVERSO PRIMORDIAL, MAS EM BREVE SERÁ SUPERADA



ESA

As Oscilações Acústicas de Bariões (BAO) funcionam como uma «régua-padrão» para medir a expansão do Universo.

As oscilações acústicas de bariões (BAO, na sigla em inglês) são uma das marcas mais fascinantes deixadas no Universo pelos processos que se seguiram ao Big Bang. Para compreender as BAO, há que imaginar o Universo primordial como uma sopa quente e densa de plasma ionizado. Nessa sopa, os bariões —partículas que incluem protões e neutrões— e os fotões —partículas de luz— estavam tão intimamente misturados que se comportavam como um fluido único.

Neste fluido, as flutuações de densidade, isto é, pequenas variações na quantidade de matéria em diferentes locais, geravam ondas de pressão. Essas ondas são semelhantes às ondas sonoras que se propagam no ar, e por isso as chamamos «oscilações acústicas». Ao propagarem-se através do Universo em expansão, estas oscilações deixavam padrões esféricos de densidade que são a assinatura característica das BAO. As BAO estão «congeladas» na radiação de 21 cm emitida pelos átomos de hidrogénio neutro no universo inicial e podem ser detetadas na distribuição das galáxias no universo atual.

Estes padrões são importantes por uma razão primordial: dão-nos uma «régua-padrão» para medir distâncias no Universo. Na recombinação, os bariões e os fotões desacoplaram-se. Os fotões formaram a CMB que observamos hoje e os bariões formaram o gás que acabou por dar origem às galáxias e aos aglomerados de galáxias. A separação entre os picos de densidade neste padrão de BAO é conhecida como o «horizonte acústico» e estima-se que meça 148 ± 3 Mpc (megaparsecs), uma unidade de distância usada em cosmologia. De facto, graças a que as BAO nos permitem ver até à «superfície de último espalhamento» (LSS), o ponto mais distante no Universo precoce que podemos observar, estimamos que possui um desvio para o vermelho (z) de 1088. Desta maneira, os padrões das BAO no hidrogénio para além de z ~6 oferecem uma janela para a evolução da composição e da geometria do cosmos.

De momento, os modelos de estrutura e evolução cósmica estão apoiados em cartografias de centenas de milhares de galáxias, como o *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS), ainda em curso. Em geral, estes registos e os modelos criados em potentes computadores de agências como a NASA e a ESA indicam que a estrutura do Universo começa a partir de estrelas agrupadas em galáxias como a Via Láctea, que por sua vez fazem parte de aglomerados que podem conter até 1000 galáxias num volume de poucos milhões de anos-luz de diâmetro. Ao mesmo tempo, estes aglomerados organizam-se em filamentos que deixam grandes vazios e que, entre outras coisas, se assemelham aos neurónios que vejo quotidianamente ao microscópio.

Por outro lado, os postulados sobre a evolução cósmica revelam-se mais problemáticos. Desde os anos sessenta, a maioria dos cosmólogos estima que pelo menos 70 % da massa das galáxias é constituída por matéria escura, um tipo de matéria não visível, mas cujos efeitos gravitacionais denunciam a sua existência. Os modelos de evolução cósmica diferem de acordo com as propriedades que se atribuam a este tipo de matéria.

Em primeiro lugar, as teorias de matéria escura fria (*Cold Dark Matter*, CDM) propõem que as galáxias se formaram em halos, em aglomerados de matéria escura que serviram de berço para a matéria bariónica. Estes halos gerariam perturbações nos sinais do hidrogénio frio que trariam consigo informação sobre processos específicos de formação de galáxias.

Por sua vez, os modelos de matéria escura morna (*Warm Dark Matter*, WDM) suprimem a ideia de halos de matéria escura abundantes e substituem-nos por partículas ultraleves que se movem rapidamente pelo espaço. Algumas simulações demonstraram que a WDM pode ocasionar um maior desvio para o vermelho e uma diminuição da pressão no sinal de 21 cm da EoR. Certamente, a busca desta característica poderia ser um projeto interessante para confirmar e descartar modelos de física de partículas.

Desta forma, estes dois tipos hipotéticos de matéria escura oferecem imagens distintas da evolução da estrutura cósmica. O modelo baseado em CDM afirma que os primeiros objetos que se formaram foram galáxias, ou fragmentos delas, que com o passar do tempo se uniram em estruturas maiores. Por outro lado, os modelos baseados em WDM indicam que a matéria escura se moveu no Universo primitivo a alta velocidade, o que permitiu alisar qualquer aglomeração que não tivesse atingido um tamanho considerável. Por este motivo, sustentam os teóricos, as primeiras estruturas que se formaram foram os filamentos, com extensões de centenas a milhares de anos-luz, e posteriormente as galáxias contidas neles. Poucas dúvidas existem de que as cartografias da EoR inclinariam a balança a favor de uma destas ideias.

Assim, as invulgares características do sinal de 21 cm fazem dele o único método conhecido para obter evidência direta sobre a estrutura e evolução, em larga

MUITOS COSMÓLOGOS ESTIMAM QUE 70 % DA MASSA DAS GALÁXIAS É CONSTITUÍDA POR MATÉRIA ESCURA

ENTRE OS INSTRUMENTOS MAIS PROMISSORES NA RADIOASTRONOMIA ESTÁ O MURCHISON WIDEFIELD

escala, do Universo nos seus primeiros anos, e sobre as condições ou fontes da reionização precoce do meio intergalático. Os alcances e limitações desta técnica são, até ao momento, na sua maioria teóricos, embora já se tenha iniciado a calibração de alguns instrumentos para observar com um detalhe nunca antes visto a EoR. Referir-me-ei brevemente a alguns dos mais importantes, sugerindo ao leitor que consulte os recursos disponíveis para obter mais informação sobre os projetos.

Talvez o projeto mais importante e representativo deste esforço seja o *Low Frequency Array* (LOFAR), nos Países Baixos, uma infraestrutura composta por duas antenas principais, a *Low Band Antenna* (LBA), que opera entre 10-90 MHz (3,3-30 m), e a *High Band Antenna* (HBA), entre 110-250 MHz (1,2-2,72 m). O projeto conta com um complexo de estações internacionais e antenas associadas, distribuídas por centenas de quilómetros em diferentes países. Entre os seus seis projetos de astronomia, o *Epoch of Reionization Key Science Project* pretende explorar o Universo desde z = 11,4 (115 MHz) até z = 6 (180 MHz) e constitui-se como o principal projeto de investigação para determinar a existência de fontes energéticas desconhecidas que possam ter estado envolvidas na reionização do meio intergalático.

À data, não foi feita uma deteção confirmada do sinal da EoR. É um sinal extremamente débil e difícil de medir devido às fontes de ruído de fundo. Não obstante, os astrónomos realizaram avanços significativos na redução do ruído e na melhoria das técnicas de deteção. O que o LOFAR já conseguiu disponibilizar é uma

SHUTTERSTOCK

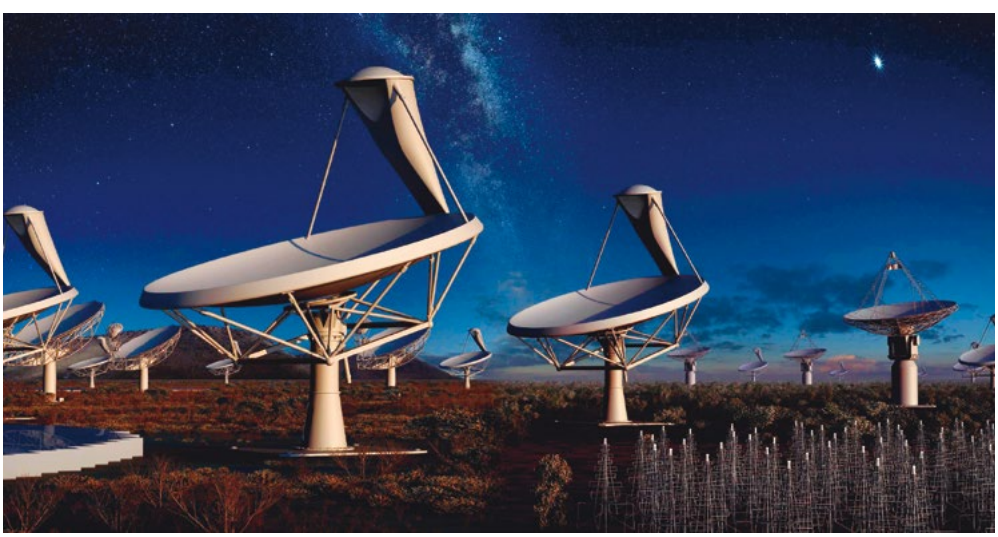
Fotografia aérea do «Superterp», o núcleo central do LOFAR (*Low-Frequency Array*) perto de Exloo, nos Países Baixos.

base de dados com 4,4 milhões de galáxias, que qualquer pessoa pode consultar e aproveitar (https://repository.surfsara.nl/collection/lotss-dr2). Fazendo uso desta informação, por exemplo, produziram-se os maiores estudos sobre colisões de aglomerados de centenas ou milhares de galáxias, e novas perspetivas sobre os campos magnéticos gigantescos nas maiores estruturas do cosmos.

Outro projeto importante é o *Square Kilometre Array* (SKA), um radiotelescópio tão sensível que poderia detetar o radar de um aeroporto situado num planeta a 50 anos-luz de distância. Este poderoso instrumento é o resultado da contribuição de 11 países e perfila-se como o maior radiotelescópio do mundo, com uma área estimada de 10^6 km^2.

O SKA será construído em duas fases: SKA1 e SKA2. A fase SKA1 divide-se em dois componentes: SKA1-Mid, na África do Sul, e SKA1-Low, na Austrália. O SKA-1-Mid contará com cerca de 200 antenas em forma de prato, enquanto o SKA1-Low contará com cerca de 130 000 antenas de baixa frequência que funcionarão por interferometria. Depois de vários anos de adiamentos, realizaram-se cerimónias para o início da construção a 5 de dezembro de 2022, na Austrália e na África do Sul. Este projeto é bastante ambicioso e pretende abordar um conjunto de questões científicas chave, entre as quais se incluem: como se formou e evoluiu o Universo primitivo? (Isto é, a Era da Reionização.) Como se formam e evoluem as galáxias? Qual é a verdadeira magnitude dos campos magnéticos galáticos? Qual é a natureza da energia escura? Existirá vida noutros lugares do Universo? Sem sombra de dúvida, é preciso coragem para estar à frente de uma empresa desta envergadura.

Entre os instrumentos mais promissores na radioastronomia encontra-se o *Murchison Widefield Array* (MWA). Este impressionante radiotelescópio de baixa frequência situa-se no tranquilo e remoto oeste da Austrália, um local que é praticamente um santuário para os radioastrónomos devido ao seu isolamento da poluição por sinais de rádio, o que garante uma observação do Universo mais limpa e precisa.



SKA ORGANISATION

Representação do *Square Kilometre Array* (SKA), um radiotelescópio tão sensível que poderia detetar um radar de aeroporto num planeta a dezenas de anos-luz de distância.

MURCHISON WIDEFIELD ARRAY/ CURTIN UNIVERSITY

Radiotelescópio australiano Murchison Widefield Array (MWA), composto por 2048 antenas em forma de aranha que captam sinais entre 70 e 300 MHz.

O MWA é uma construção assombrosa que consta de 2048 antenas, cuidadosamente distribuídas numa área de um quilómetro e meio. Cada uma destas antenas foi otimizada para detetar sinais num intervalo específico de frequências, que abrange dos 80 aos 300 MHz, ou, por outras palavras, comprimentos de onda entre 1 e 3,75 metros. Esta otimização permite ao MWA observar fenómenos astrofísicos únicos que ocorrem nestas frequências.

Até setembro de 2022, o MWA recolheu uma quantidade assombrosa de dados: 43 petabytes, para ser exato. Para colocar isto em perspetiva, é informação suficiente para encher mais de 40 000 computadores domésticos —uma acumulação de dados que ilustra o incrível poder e alcance deste radiotelescópio. Todo este conjunto de dados está à disposição dos investigadores e do público em geral e pode ser consultado através do seu sítio (https://www.mwatelescope.org).

Em 2019, uma equipa de investigação da Universidade Brown, nos Estados Unidos, realizou uma análise pioneira dos dados recolhidos pelo MWA. Os resultados do seu estudo foram notáveis, pois estabeleceram o limite mais baixo até à data para a deteção dos sinais de hidrogénio a um *redshift* (z) de aproximadamente 7. Este marco técnico proporciona uma nova janela para o Universo primitivo, permitindo aos astrónomos explorar os mistérios da «Idade Escura» cósmica.

Entretanto, o MWA continua a progredir na sua missão científica. A administração do telescópio está a receber propostas de observação de investigadores de todo o mundo, desejosos de apontar as antenas do MWA para regiões específicas do céu, a fim de os ajudar a responder às suas perguntas sobre o Universo inicial. Além disso, vale a pena salientar que o MWA não está sozinho nesta empresa. Está a trabalhar em colaboração com outros instrumentos de investigação, como o *Precision Array to Probe the Epoch of Reionization* (PAPER).

Juntos, o MWA e o PAPER são pilares de um projeto ainda mais ambicioso: o *Hydrogen Epoch of Reionization Array* (HERA). O HERA é um radiotelescópio em construção que promete revelar os segredos da Época da Reionização.

O acontecimento astronómico mais relevante da época é, sem sombra de dúvida, o lançamento do *James Webb Space Telescope* (JWST). Ao longo dos anos, os entusiastas do cosmos enfrentaram uma montanha-russa de emoções devido aos atrasos e adiamentos deste ambicioso projeto por mais de uma década. O lançamento do JWST estava programado para outubro de 2018, mas, como sucedeu em ocasiões anteriores, não se concretizou. Contudo, o melhor presente que recebemos no Natal de 2021 foi a descolagem de um gigantesco foguetão a partir do Centro Espacial da Guiana, levando a bordo o JWST.

Este telescópio tem o nome do segundo diretor da NASA, James Webb, que liderou a organização de fevereiro de 1961 até 1968. O JWST é fruto de três décadas de meticulosa planificação e construção, bem como de um investimento de 10 000 milhões de dólares. O telescópio tinha de ser, por necessidade e não por mera vaidade, um instrumento perfeito. Recordemos o desafortunado lançamento do telescópio espacial *Hubble* em 1990: um erro de cálculo por parte dos engenheiros fez com que o *Hubble* sofresse de uma espécie de «miopia cósmica». As suas primeiras imagens, turvas e desfocadas, foram uma grande deceção.

Só em dezembro de 1993 uma missão da NASA levou astronautas até ao telescópio para o reparar. Esta arriscada operação durou onze dias e acabou por corrigir o problema de visão do *Hubble*. Posteriormente, os astrónomos apontaram as suas lentes para o que parecia ser «o nada» e descobriram que o Universo estava repleto de galáxias em todas as direções. Tivemos ao nosso alcance centenas de fotografias que mostravam a magnitude e a antiguidade do nosso lar cósmico. Desde então, o *Hubble* foi alvo de quatro missões de atualização e reparação que ampliaram a sua capacidade para explorar as profundezas do Universo. As suas imagens, cuja beleza desafia a imaginação de qualquer artista, maravilharam-nos a todos.

A situação do JWST, contudo, apresenta um panorama totalmente diferente. Este instrumento está destinado a residir num ponto conhecido como L2, onde a gravidade da Terra e do Sol se equilibram, criando uma órbita em torno do astro-rei. Enquanto os astronautas que viajaram à Lua demoraram cerca de 3 dias, o trajeto até ao ponto L2 leva aproximadamente um mês, sendo uma distância quatro vezes maior do que a que separa o nosso planeta do seu satélite. Isto significa que os engenheiros da NASA têm de controlar este precioso instrumento a milhões de quilómetros de distância. Em caso de falha, o JWST é irrecuperável: enviar uma equipa de reparação a L2 está simplesmente fora do nosso alcance. Se o virmos em perspetiva, o JWST tem muitos mais potenciais pontos de falha do que as missões que colocaram um homem na Lua ou um *rover* em Marte. Tecnicamente, é uma façanha muito mais desafiante. Os engenheiros e operadores

NO PONTO CONHECIDO COMO L2, A GRAVIDADE DA TERRA E DO SOL EQUILIBRAM-SE

tinham de antecipar qualquer problema antes de o telescópio se tornar inalcançável para reparação.

Além disso, o JWST exigiu o desenvolvimento de tecnologias totalmente novas, avanços que nenhuma outra entidade possui. Por exemplo, utiliza um sistema de movimento e focagem único, que não se encontra em nenhum outro telescópio, seja terrestre ou espacial. O JWST é, em muitos aspetos, o auge de todos os telescópios construídos pelo ser humano, uma verdadeira maravilha da era moderna.

Por todas estas razões, a administração do JWST esteve sujeita a críticas constantes e a preocupações sobre possíveis falhas no desenho e na construção do instrumento. Enfrentou numerosos atrasos, crises financeiras e de pessoal e até ameaças de cancelamento do projeto. Imagine o que isto significa: neste telescópio condensam-se os sonhos e os esforços de mais de 10 000 pessoas que trabalharam no projeto. Motivos mais do que suficientes para desanimar, mas se há algo que caracteriza as mulheres e os homens de ciência é a sua persistência —a mesma que nos permitiu visitar outros mundos no último meio século.

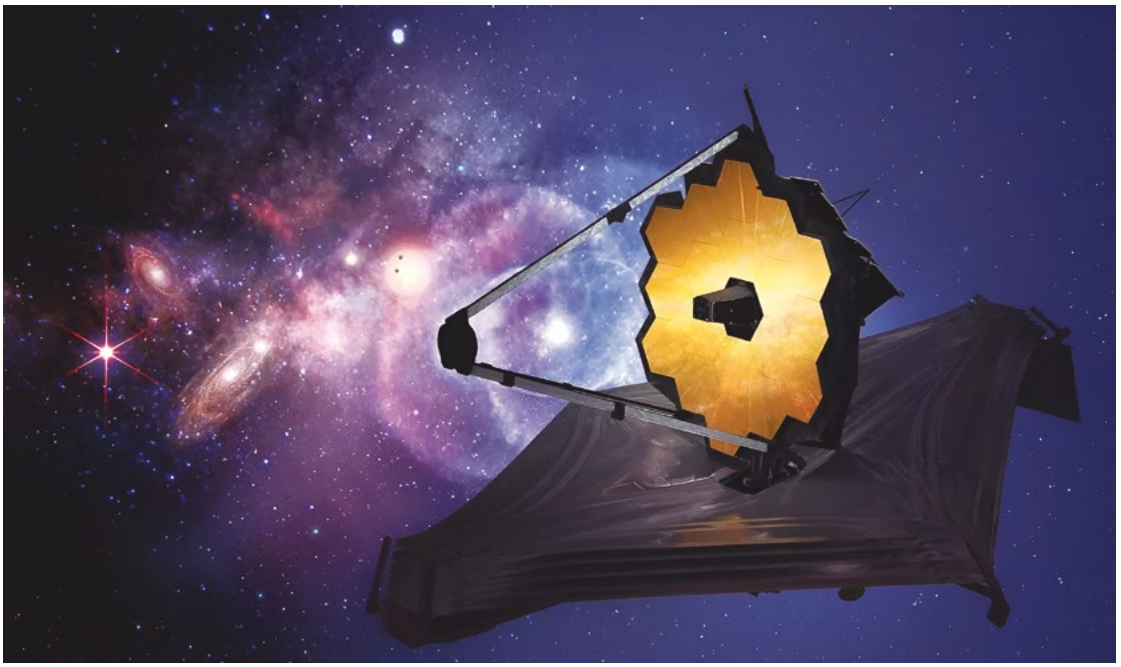
Durante a última década, o JWST foi submetido a múltiplos testes. Por exemplo, foi introduzido numa câmara criogénica para avaliar a sua resistência às condições gélidas do espaço. Realizaram-se também testes de vibração, sujeitando o telescópio a intenso esforço para simular as duras condições do lançamento a que se iria enfrentar. O instrumento deve sobreviver às vibrações que se produzem quando os motores do foguetão se acendem e este inicia a sua ascensão através da atmosfera. Se o JWST pode sobreviver a estes ensaios nas instalações da NASA, então, teoricamente, também deverá resistir ao lançamento real. Todos vimos como os foguetões vibram temerariamente mesmo antes da descolagem. É uma prova de resistência que, pessoalmente, me seria insuportável.

O JWST representa a missão mais complexa e arriscada que a NASA empreendeu até à data. Esta missão poderia resultar num triunfo metodológico monumental ou, pelo contrário, num desastre dilacerante e num colossal desperdício de fundos públicos. Falamos de colocar um telescópio em órbita a um milhão de milhas de distância, onde mil coisas poderiam correr mal.

Contudo, contra todas as probabilidades, o telescópio chegou satisfatoriamente ao espaço. Os operadores da NASA, em Baltimore, passaram sete dias a desdobrar meticulosamente a primeira etapa de um instrumento de sete toneladas que se deslocava a uma milha por segundo —um feito impressionante, considerando a enorme distância que os separava. Depois, o telescópio viajou durante um mês até ao seu local de operação. Ao contrário da Estação Espacial Internacional ou do *Hubble*, que podem ser vistos como pontos brilhantes no céu a partir da Terra, o JWST não é visível a olho nu. Em seu lugar, os operadores confiam numa ferramenta animada que simula o estado do telescópio.

O JWST foi concebido especificamente para observar o Universo no espetro in-

O JWST FOI INTRODUZIDO NUMA CÂMARA CRIOGÉNICA PARA AVALIAR A SUA RESISTÊNCIA ÀS CONDIÇÕES GÉLIDAS



NASA

Quatro anos após o seu lançamento, o Telescópio Espacial *James Webb* (JWST) continua a reescrever a astronomia.

fravermelho. As primeiras galáxias estão tão distantes que a maior parte da sua luz nos chega neste espetro, mais vermelho do que os nossos olhos conseguem percecionar. Poderíamos ter um telescópio que operasse na luz visível duas, três, até quatro vezes maior do que o *Hubble*, e ainda assim não conseguiríamos ver as galáxias na sua infância. A formidável dimensão e atributos do JWST conferem-lhe capacidades sem precedentes para estudar exoplanetas, observando as suas atmosferas e detetando elementos químicos, muitos dos quais estão associados à vida. Sem lugar a dúvidas, o JWST foi lançado com o propósito de reescrever a nossa história no Universo. Representa um salto quântico na busca de vida extraterrestre e vai mudar de forma fundamental a nossa compreensão da evolução cósmica.

Após o meticuloso desdobramento e uma série de calibrações exaustivas, a 11 de julho de 2022 recebemos a primeira imagem a cores, a primeira fotografia de campo profundo do JWST. Esta deslumbrante imagem foi apresentada pelo próprio presidente dos Estados Unidos, Joe Biden, na televisão e nas redes sociais da NASA. Milhões de pessoas, hipnotizadas perante os seus televisores e ecrãs de computador, ficaram fascinadas com este mosaico de arte natural que o telescópio nos apresentou. Estávamos a observar a nossa própria origem há 13 mil milhões de anos, no início de tudo o que existiu, existe e existirá; a contemplar galáxias no limite do espaço e do tempo, nos confins da nossa compreensão. A primeira imagem do JWST é um retrato da nossa história, de uma odisseia através de éones de eventos cósmicos que apenas começamos a entender. Estou certo de que não fui o único a derramar lágrimas diante do seu computador ao ver essa imagem.

O JWST representa uma nova maneira de ver o Universo, que transcende os li-

mites do que poucos no passado puderam imaginar. Como teria reagido Galileu se lhe disséssemos que um dia colocaríamos um instrumento para além da Lua para observar o começo de toda a existência? Esta conquista não é apenas da NASA e da ESA; é uma façanha de toda a humanidade. É uma prova concreta do que podemos alcançar quando trabalhamos em conjunto para um objetivo comum.

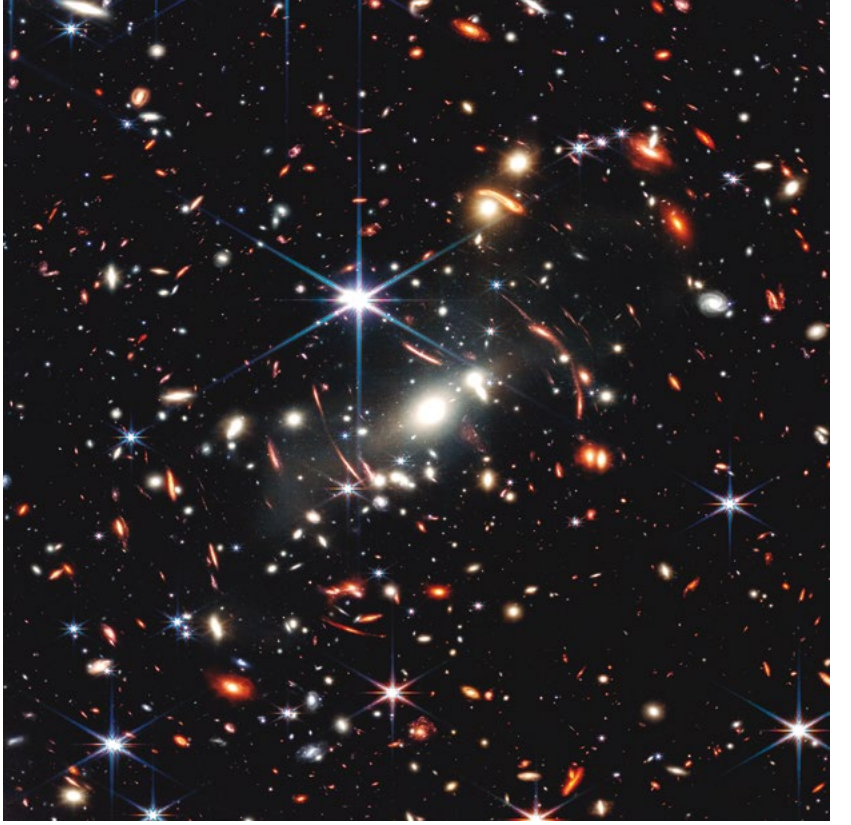
Espera-se que a missão do JWST tenha uma duração mínima de uma década, embora seja muito provável que desfrutemos dos dados que fornecerá durante muitos mais anos. Até agora, o telescópio permitiu-nos conhecer HIP 65426 b, o primeiro exoplaneta fotografado diretamente, um feito que muitos julgavam impossível. Também nos revelou WASP-39b, um gigante gasoso situado a 700 anos-luz da Terra, que apresenta a primeira evidência de dióxido de carbono numa atmosfera planetária fora do nosso Sistema Solar. Além disso, uma aproximação aos míticos Pilares da Criação permitiu captar milhares de protoestrelas que se manifestam como pequenos pontos vermelhos. Este cenário é a tela perfeita para que os astrónomos aprofundem os mecanismos de formação estelar. Do mesmo modo, o JWST permitiu-nos conhecer detalhes adicionais de centenas de galáxias e de outros fenómenos cósmicos que os astrónomos começaram a estudar. O melhor de tudo é que todos os dados recolhidos pelo telescópio são disponibilizados ao público em devido tempo, e o telescópio conta com um fantástico centro de informação (https://webbtelescope.org/).

É assim que os projetos de observação da Idade Escura pretendem levar as observações astronómicas para além de z ~6. Poderemos chegar até ao ponto onde os astrónomos atuais ficam cegos, na época da recombinação, a z ~1100. É provável que lhe tenha chamado a atenção a gama de deteção destes radiotelescópios. Por que razão serão detetados sinais acima do metro se a emissão do hidrogénio frio mede apenas 21 cm? Que ideia lhe ocorre? Bem, se para algo serviu a introdução deste especial, a resposta é simples: a expansão do Universo esticou a onda de 21 cm para valores acima do metro; um metro no final da EoR e centenas de metros no início da Idade Escura.

Já sabemos que detetar as emissões do hidrogénio frio não é tarefa fácil. A principal limitação é que o sinal é bastante débil e requer centenas de horas de síntese. Por esta razão, os mapas da Idade Escura demorarão algumas décadas a completar-se. Adicionalmente, existem três fatores que os astrónomos devem ajustar para obter um registo limpo: o ruído das emissões galáticas, calculado em mil vezes mais intenso do que o sinal de 21 cm; o ruído da ionosfera; e as emissões terrestres de baixa frequência.

Para evitar os dois últimos fatores, chegou a ponderar-se a colocação de radiotelescópios no lado oculto da Lua. Contudo, é importante saber que todos os observatórios de rádio se encontram na Terra, dado que este tipo de radiação atravessa a atmosfera sem grande dificuldade, ao contrário dos raios X ou gama, que necessitam de observatórios no espaço. Além disso, em terra pode ampliar-

UMA APROXIMAÇÃO AOS MÍTICOS PILARES DA CRIAÇÃO PERMITIU CAPTAR MILHARES DE PROTOESTRELAS



Primeira imagem de campo profundo realizada pelo telescópio *James Webb*, que mostra o aglomerado de galáxias SMACS 0723.

-se a sua eficácia através da interferometria. Colocar radiotelescópios no espaço seria muito dispendioso para qualquer projeto astronómico e não traria melhorias significativas.

Apesar das desafiantes condições e limitações de realizar observações a partir da Terra, os investigadores argumentam que o sinal de 21 cm possui características únicas que o distinguem de outras fontes de interferência. Isto significa que, em teoria, é possível realizar as calibrações instrumentais necessárias para estudar o Universo primitivo sem sair da atmosfera terrestre.

O radiotelescópio *Low Frequency Array* (LOFAR) demonstrou que se podem fazer progressos significativos neste sentido. Apesar de estar situado no interior da nossa atmosfera, o LOFAR realizou registos preliminares que sugerem que não existem obstáculos fundamentais que impeçam o estudo da Idade Escura do Universo a partir da Terra. Estes resultados indicam que é possível superar o «ruído de fundo» da Terra e outras fontes de interferência para detetar o débil sinal de 21 cm do hidrogénio neutro. Isto é encorajador para os astrónomos, pois significa que podemos começar a explorar esta fascinante época da história cósmica utilizando os telescópios terrestres que já temos ou que se encontram em construção. Os primeiros resultados são promissores e sugerem que estamos no caminho certo para desvendar os mistérios do Universo inicial.

Por último, na ausência de mapas completos que contemplem observações abaixo dos 30 MHz, os radiotelescópios da Idade Escura serão os encarregados de fornecer estes registos e, assim, eliminá-los das experiências, juntamente com outros sinais que podem afetar o espetro esperado.

A ideia de Loeb não é apenas um novo método de exploração dos céus, mas uma

NASA, ESA, CSA, STScI; JOSEPH DEPASQUALE (STSCI), ANTON M. KOEKEMOER (STSCI), ALYSSA PAGAN (STSCI).

O *Hubble* (esq.) mostrou-nos a superfície destas nuvens gigantes em 2014; o *Webb* (dir.) permite-nos ver através delas para observar novas estrelas desde 2022.

nova etapa da cosmologia, algo que ninguém tinha concebido anteriormente. Embora seja uma das áreas de investigação menos conhecidas pelos aficionados e amantes desta disciplina, é bom saber que a cartografia da região do espaço que abrange cerca de mil milhões de anos nos proporcionará um plano detalhado da formação das primeiras galáxias, das megaestruturas cósmicas e das fontes de reionização. Apenas alguns anos nos separam de mudar as nossas ideias sobre a evolução do Universo primordial e de revelar se, de facto, a Idade Escura faz jus ao seu nome.

A ideia de que o Universo teve um princípio e evolui com o tempo deu origem à cosmologia no início do século XX. Do meu ponto de vista, pensar num começo para tudo é algo fascinante e, ao mesmo tempo, aterrador —motivo suficiente para que alguns, como Einstein, demorassem a aceitá-lo, e para que outros, como Hoyle, nunca dessem esse passo. Para nós, filhos de finais do século XX e princípios do XXI, pode ser, num primeiro momento, algo fácil de aceitar. Porém, quando analiso a ideia a fundo, não consigo deixar de sentir um vazio que não sei descrever.

A cosmologia do Big Bang é, por agora, um campo com muitas hipóteses e poucas certezas, mas, afinal, uma disciplina em movimento, que se renova e evolui dia após dia. Neste momento, talvez me reconforte o facto de que as respostas a todas as incógnitas colocadas neste avatar estejam ainda bastante distantes ou, talvez, de que nunca as encontremos. Poderemos alguma vez ter a certeza, uma resposta para além de qualquer dúvida, que nos indique como começou tudo? Mudariam em algo as nossas vidas, a nossa forma de ver e entender o mundo, e a maneira como nos relacionamos com os demais e com o nosso entorno?

Não são menos surpreendentes as fantásticas, mas ao mesmo tempo terrivelmente sérias, hipóteses sobre um multiverso, como as defendidas por afamados cosmólogos como Michio Kaku, Brian Greene e Leonard Susskind. Com o trabalho de Hugh Everett em meados do século XX, e os desenvolvimentos posteriores da teoria das cordas, chegámos a considerar que o nosso Universo pode ser apenas

MAPEAR TODA UMA REGIÃO DE MIL MILHÕES DE ANOS SERÁ TAREFA DE VÁRIAS GERAÇÕES DE CIENTISTAS

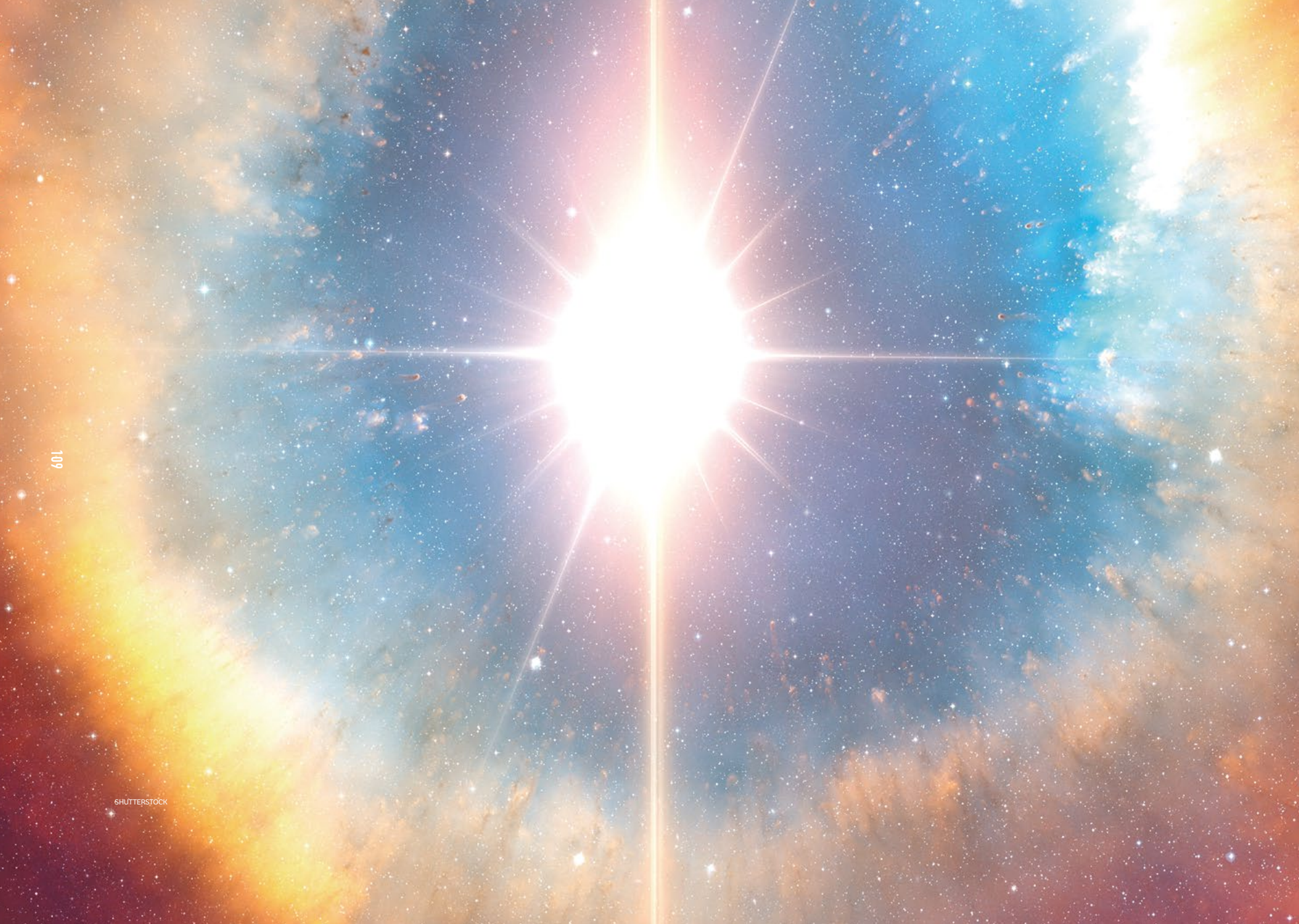
um entre milhares de milhões —ou mesmo infinitos— universos que habitam um hiperespaço com outras dimensões inimagináveis. Além disso, estranhamente, os cosmólogos colocaram nas nossas mentes algumas ideias sobre os universos irmãos, e descobertas como as de Alexander Kashlinsky podem indicar-nos como estamos a interagir com eles. Serão esses universos uma realidade física? Estarão habitados por seres pensantes como nós? Embora a paisagem cósmica seja um conceito que parece estar muito longe da sua forma final, dá indubitavelmente consistência ao que anteriormente eram apenas pensamentos estranhos, sonhos e fantasias.

Graças a Newton, que postulou leis aplicáveis a corpos na Terra e no espaço, e a Maxwell, que descreveu em quatro equações a eletricidade e o magnetismo como duas faces do mesmo fenómeno, os cientistas imaginaram que uma teoria —talvez uma única equação— pode reunir as quatro forças conhecidas da natureza. Muitos teóricos consideram que uma ToE pode ser a resposta para as perguntas sobre a singularidade, os problemas do Big Bang e os primeiros instantes do cosmos. Conseguirá alguém cumprir o sonho de uma teoria final? Corresponderá esta teoria às expectativas nela depositadas?

Durante quase meio século, os físicos de partículas estiveram em busca do bosão de Higgs, uma partícula hipotética que dotaria de massa as outras partículas do aparentemente interminável zoológico cósmico. Como é natural, os reconhecimentos e o Prémio Nobel não se fizeram esperar quando os cientistas do CERN confirmaram a previsão. A física de partículas é outra das disciplinas com um potencial enorme para moldar as nossas crenças sobre o Universo. Geralmente, as teorias cosmológicas que tentam dar resposta a diversos enigmas predizem a existência de partículas com diferentes características, que devem ser detetadas posteriormente nos cada vez mais gigantescos aceleradores de partículas em todo o mundo. Por outro lado, não são de todo desprezáveis os projetos que tentam reproduzir, mediante colisões de partículas a altíssimas energias, as condições dos primeiros instantes do cosmos. Consegue imaginar que os cientistas tentam reproduzir, num laboratório subterrâneo, a origem do Universo? Definitivamente, a capacidade que a ciência tem para nos surpreender não conhece limites.

Finalmente, a radioastronomia coloca-nos às portas de um capítulo completamente novo no livro da cosmologia. Durante anos, as observações astronómicas tornaram-se opacas quando se tentava observar para além de $z \sim 6$. No entanto, é possível que esta região do céu se converta na nova Pedra de Roseta da cosmologia. Mapear toda uma região de mil milhões de anos, da qual não se possui qualquer registo, será uma tarefa para várias gerações de cientistas. Esperamos que esta travessia traga consigo dados que alterarão, de diversas maneiras, as nossas teorias e crenças sobre o Universo e a sua evolução. É provável que, no início da próxima década, a Idade Escura conceda os primeiros Prémios Nobel e as primeiras alegrias —e lágrimas— aos teóricos do Universo primitivo. ■

A cidade no fim da eternidade



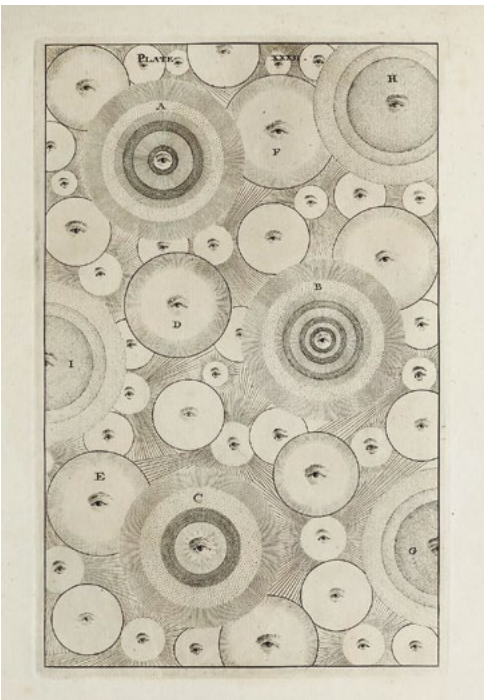
SHUTTERSTOCK

A *cidade no fim da eternidade* é um dos episódios mais aclamados da reconhecida série de televisão *Star Trek*, que por sua vez me inspirou uma ideia bela, exótica e avassaladora. Se saíssemos da Terra numa viagem intergalática até aos destinos mais remotos do cosmos, conseguiríamos chegar a uma cidade nos confins do universo? Poderá existir um planeta onde os seus habitantes, ao olharem para a esquerda, vejam o cosmos em todo o seu esplendor, mas para a direita encontrem o nada, o fim do espaço-tempo?

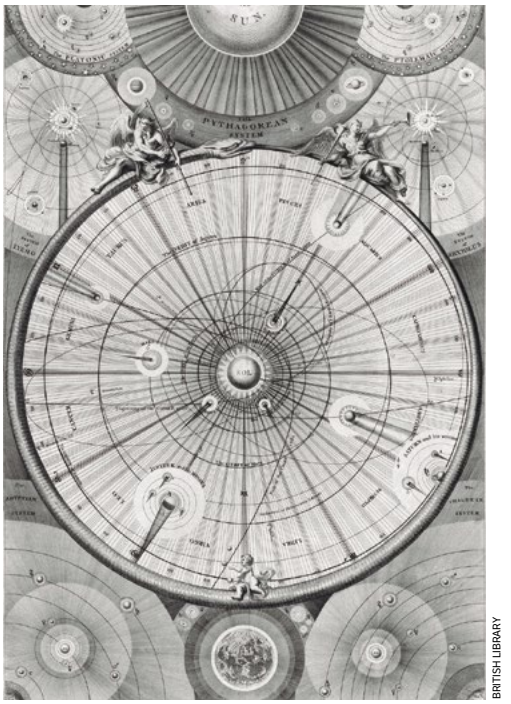
Esta imagem, por mais estranha ou incorreta que pareça, guiará grande parte do conteúdo desta secção. A segunda faceta da cosmologia moderna coloca perguntas como: vivemos num universo finito ou infinito? Se for finito, qual é a sua dimensão? Poderá ter um limite? Qual é a forma do universo? No final, ficará com algumas ideias que lhe permitirão repensar as possibilidades de existir uma cidade de sonho à beira do abismo cósmico.

O espaço é um manto de escuridão salpicado por pontos luminosos que parecem estender-se até ao infinito. Enquanto habitantes deste pequeno planeta, é uma tarefa árdua indagar quão profundo é o céu, ou a que distância se encontra cada uma das ténues luzes que o ornamentam. Atualmente, os instrumentos astronómicos permitem-nos lidar melhor com estas incógnitas, mas antes da invenção do telescópio, os pensadores e filósofos da ciência tinham a mesma limitação que o cidadão comum. Por conseguinte, apenas o raciocínio lógico e estético — e, nalguns casos, a Matemática — definiam quão grande e profundo poderia ser o céu.

Uma das mais antigas questões cosmológicas diz respeito à extensão física do espaço. É finito ou infinito? Começando pela Terra, como posição definida no cos-



BRITISH LIBRARY



BRITISH LIBRARY

Representações cosmológicas do século XVIII de Thomas Wright, em que o universo é concebido como um sistema ordenado de estruturas estelares distribuídas pelo infinito.

mos, o matemático grego Pitágoras de Samos (569–475 a.C.) sustentou que a Terra e o espaço eram regidos por relações matemáticas que definiam completamente a realidade. Nesse sentido, visualizava um universo constituído por esferas harmónicas que, sendo esferas, eram finitas em alguma medida.

SHUTTERSTOCK

Pitágoras de Samos, filósofo e matemático, impulsionador de uma visão do cosmos baseada na harmonia e nas proporções numéricas.

O filósofo grego Parménides de Eleia (540–470 a.C.) considerava que tudo o que existia perdurava. As mudanças observadas pelo ser humano na natureza seriam apenas uma ilusão de um elemento subjacente que permanecia sempre intacto e presente. Nesta medida, o próprio universo sempre teria existido.

Por seu turno, à semelhança de Pitágoras, Aristóteles concebia o universo como um gigantesco mecanismo de esferas harmónicas. No seu texto *Sobre o Céu*, expõe a sua visão do cosmos como uma esfera necessariamente finita: «Se o céu fosse infinito e girasse em círculo, atravessaria uma distância infinita num tempo infinito... algo que sabemos ser impossível». Para este pensador, no limite externo do cosmos encontrava-se a maior das esferas, que girava em torno da Terra: o lugar onde estavam fixas as estrelas.

Um século antes, o filósofo, matemático e astrónomo grego Arquitas de Tarento (428–347 a.C.) havia enfrentado analiticamente a questão da finitude do universo, propondo um argumento sob a forma de experiência mental que continua, ainda hoje, interessante e profundo. Se uma pessoa estivesse de pé no limite do universo e estendesse a mão, a ponta do seu dedo passaria a ser o novo limite. Se, nesse momento, se colocasse sobre o novo limite e voltasse a estender a mão, consolidaria outro novo limite. Este raciocínio levou Arquitas a sustentar que, se este exercício se repetisse um número indefinido de vezes, não existiria um limite definido; logo, o universo deveria ser infinito. Esta posição era partilhada por outros eminentes filósofos gregos, como Demócrito (460–370 a.C.) e Epicuro (341–270 a.C.), que introduziram, além disso, a ideia de um universo composto por átomos que povoavam o vazio.

SE SAÍSSEMOS DA TERRA NUMA VIAGEM INTERGALÁTICA, CONSEGUIRÍAMOS CHEGAR A UMA CIDADE NO LIMITE DO UNIVERSO?

Este tipo de dogmas e reflexões marcou de forma significativa os paradigmas e as ideias sobre o universo que surgiram nos dois milénios seguintes. Depois, a partir do século XVI, com pensadores como Copérnico, Descartes, Galileu, Kepler e Newton, o tema deixaria o seu cunho filosófico para passar a ser objeto de análise através do método científico e das leis da Física.

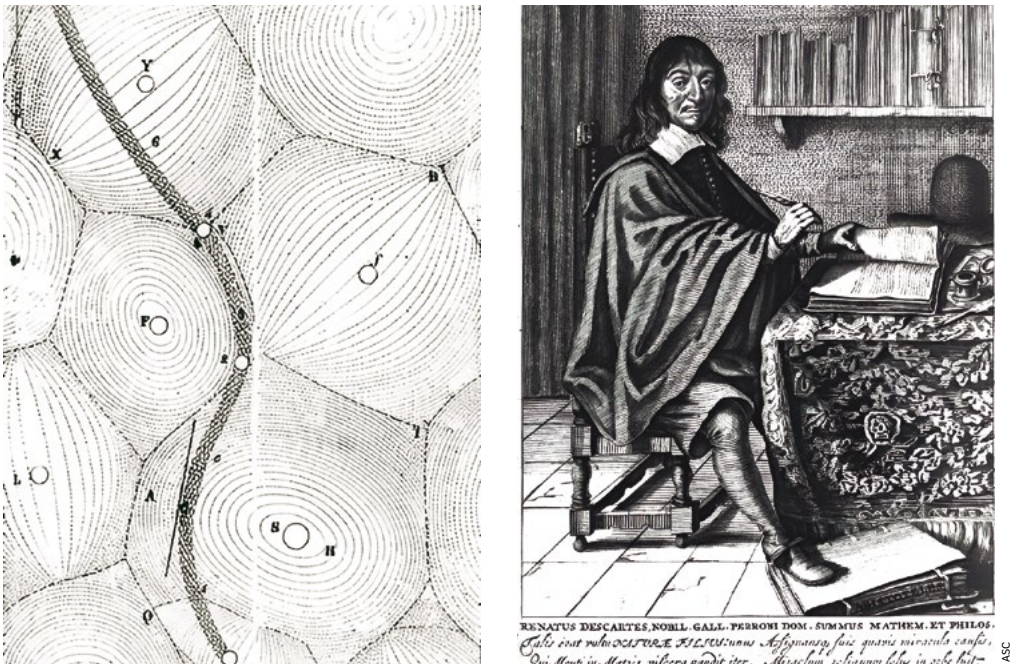
Por exemplo, o matemático e filósofo francês René Descartes (1596–1650) considerava que o vazio povoado por átomos, tal como propunham os atomistas, não podia ser real, pois implicaria que os corpos em movimento no espaço poderiam atingir velocidades infinitas. O filósofo baseou-se nas leis aristotélicas para incluir forças que se opunham ao movimento dos corpos, evitando assim que atingissem velocidades infinitas ou permanecessem em movimento para sempre. Descartes postulou que cada recanto do universo estava preenchido por éter, uma substância que oferece resistência a todos os corpos que se deslocam no espaço. Deste modo, como a velocidade de um corpo não podia ser infinita, e também não se haviam observado infinitos na natureza, o matemático francês inferiu que o próprio universo deveria ser finito.

Anos depois, Newton sustentou que o espaço e o tempo eram entes absolutos, imodificáveis e infinitos. Segundo ele, o espaço estende-se infinitamente em todas as direções, ao passo que o tempo o faz do mesmo modo, tanto para o passado como para o futuro. Além disso, pensava que o espaço era um ente completamente euclidiano — plano —, que em nenhuma medida, e sob circunstância alguma, alterava o seu tamanho ou curvatura.

A incógnita mais importante que nasce da noção newtoniana é o paradoxo de Olbers, formulado em 1823 pelo astrónomo e médico alemão Heinrich Wilhelm Olbers (1758–1840). O problema era mais ou menos assim: se o universo é imutável e infinito em extensão, pode inferir-se que também há um número infinito de estrelas a povoá-lo. Se assim fosse, o céu noturno não deveria ser escuro, nem apresentar um número contável de estrelas. Pelo contrário, deveríamos observar um céu completamente resplandecente com a luz de infinitas estrelas num universo infinito. A noite, na realidade, não existiria. Porque vemos apenas algumas estrelas? Esta reflexão é útil para nos interrogarmos sobre a finitude do espaço do seguinte modo: hoje sabemos que a velocidade da luz é finita e, portanto, a luz emitida por muitos corpos celestes ainda não nos alcançou, nem o fará no futuro. Se imaginássemos, por um momento, que a velocidade da luz é infinita, veríamos um céu como o que Olbers imaginava, ou a noite seria escura e os objetos celestes ainda distinguíveis?

Outra reflexão deriva do conceito de inércia local, proposto por Ernst Mach (1838–1916), físico e filósofo austríaco que foi o principal referente filosófico de Einstein nas suas formulações da relatividade. Mach expõe que a inércia local resulta das contribuições das massas que se estendem até ao infinito. Assim, um universo newtoniano teria uma massa infinita. Isto coloca um problema impor-

OS AVANÇOS CIENTÍFICOS DO SÉCULO XX REINVENTARAM AMPLAMENTE OS LIMITES DO PENSAMENTO HUMANO



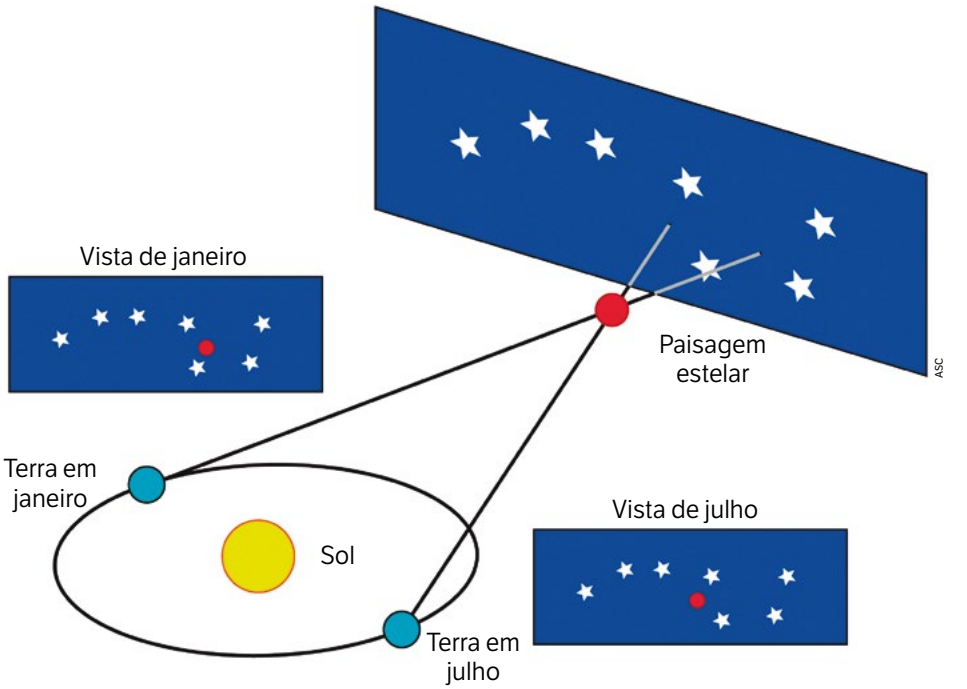
ASC ASC

Representação do universo cartesiano (esq.), um cosmos cheio de matéria em movimento que forma redemoinhos ou vórtices, segundo a visão de René Descartes (dir.) no século XVII.

tante, porque a relatividade indica que uma massa infinita conduz também a uma curvatura infinita. Adicionalmente, de um ponto de vista quântico, um universo infinito cumpriria as leis da probabilidade um número infinito de vezes; logo, os fenómenos físicos ocorreriam também nessa mesma medida.

O que antecede permite perceber que o problema da finitude do universo não está apenas relacionado com a extensão física do espaço e a possibilidade de encontrar um limite, mas também com outros fatores, como o número de corpos celestes e a quantidade de massa e energia que alberga. Durante cerca de 2500 anos, estas questões estiveram fora do alcance de qualquer pensador, por mais arguto que fosse. Contudo, os avanços científicos do século XX reinventaram amplamente os limites do pensamento humano. Graças a isso, podemos hoje enfrentar os mesmos dilemas que ocuparam as mentes de Arquitas e Aristóteles com uma precisão sem precedentes. A primeira evidência que possuímos sobre a extensão física do espaço é o registo das distâncias a diversos corpos celestes e a distribuição da matéria no universo observável. A medição das distâncias no universo denomina-se cosmografia e constitui uma das áreas mais complexas das ciências do espaço.

Os cientistas dispõem de dados sobre as distâncias a corpos celestes situados tanto na Via Láctea como muito para além dela. Embora estes registos não definam por si mesmos a finitude ou infinitude do espaço, dizem-nos que vivemos num universo muito grande que aumenta de tamanho constantemente. O universo é enorme, muito maior do que alguém pôde imaginar no passado, e muito maior do que o leitor é capaz de conceber neste momento. Façamos um exercício simples mas elucidativo. Pense na grandeza do universo, imagine-a. Lamento dizer-lhe que é muito maior do que aquilo que acabou de imaginar. Tente de



O movimento aparente de uma estrela próxima contra o fundo de estrelas mais distantes quando a Terra gira em torno do Sol é conhecido como paralaxe estelar.

novo... lamento, terá de se esforçar mais, porque continua a ser muito maior. Até ao infinito? Talvez não, mas a nossa mente não consegue lidar com dimensões tão descomunais.

Para medir distâncias no espaço existem vários métodos, alguns conhecidos há séculos e outros próprios do desenvolvimento tecnológico do século XX. Um dos mais antigos, a paralaxe trigonométrica, consiste em observar a mudança aparente de posição de um corpo. Para o fazer, é necessário observá-lo a partir de dois lugares distintos. Neste mesmo momento, pode realizar uma experiência de paralaxe. Coloque o seu dedo indicador direito à frente do rosto e feche alternadamente os olhos. Ao fazê-lo, verá que, embora o dedo permaneça imóvel, cada um dos olhos lhe indica posições diferentes dele, como se de algum modo se estivesse a mover. Pode agora repetir o mesmo exercício tomando como referência um objeto mais distante, talvez a dois ou três metros, e observará uma mudança aparente de posição muito menor. Qual é a sua conclusão? Provavelmente a mesma a que chegaram os antigos astrónomos: quanto mais distante estiver um objeto, menor é a sua variação aparente de posição.

De forma análoga, os astrónomos tiram uma fotografia em janeiro, quando a Terra está de um lado do Sol, e outra em junho, quando se encontra no lado oposto — uma separação de 300 milhões de quilómetros. A paralaxe trigonométrica é uma técnica direta muito precisa, mas limitada pela distância: só é eficaz para as estrelas mais próximas. Para as mais distantes é preciso procurar outra via, pois a mudança aparente de posição torna-se cada vez mais impercetível à medida que a distância aumenta.

Outro método foi o que Edwin Hubble utilizou para medir a distância às galáxias. A princípio, este astrónomo partiu do pressuposto de que todas as galáxias tinham a mesma luminosidade. Porém, como ele próprio viria a descobrir, as galáxias di-

ferem nas suas propriedades, devido às mudanças físicas que a sua evolução pode acarretar. A luminosidade das galáxias jovens — distantes — é maior do que a das próximas, enquanto as galáxias próximas — antigas — podem parecer mais brilhantes por estarem mais perto. Como distinguir estas propriedades? Felizmente, o trabalho de uma cientista até então pouco conhecida forneceria a Hubble a chave do sucesso.

A astrónoma norte-americana Henrietta Leavitt (1868–1921) integrou o denominado Harém de Pickering, um grupo de mulheres contratadas por Charles Pickering, diretor do Observatório de Harvard, como força de trabalho dedicada a tarefas astronómicas sistemáticas e morosas. Apesar de ser um trabalho pouco reconhecido, o catálogo de estrelas variáveis nas Nuvens de Magalhães que Leavitt realizou é um dos pilares da observação astronómica. Para desgosto de alguns, entre os quais me incluo, não foi ainda feito o merecido reconhecimento ao seu trabalho no estrado da ciência.

Em 1908, com 40 anos, Leavitt descobriu as estrelas cefeidas, corpos pulsantes cujo brilho pode ser observado a partir de outras galáxias. A luminosidade das cefeidas varia de modo regular, com períodos geralmente entre 2 e 100 dias, de forma semelhante à de um coração a palpitar. O estudo sistemático deste tipo de estrelas permitiu a esta astrónoma encontrar uma relação direta entre a luminosidade e o período da estrela: as mais luminosas apresentam períodos mais longos. Esta relação permite deduzir a distância da estrela, dado que o seu brilho decresce com o inverso do quadrado da distância, sob a notação matemática:

ASC

Henrietta Leavitt identificou mais de 2400 estrelas variáveis e forneceu a «regra» para calcular distâncias astronómicas.

$$B = L/ 4\pi d$$

Desde então, as estrelas que Leavitt descobriu e estudou são corpos celestes designados por velas padrão, ou seja, fontes que possuem alguma propriedade invariável, conhecida com elevado grau de precisão, e que, neste caso, varia apenas com a distância. Em termos coloquiais, imagine que Leavitt descobriu quais as estrelas de 100 W e quais as de 70 W. Assim, conhecendo a sua luminosidade intrínseca, podemos avaliar corretamente a que distância se encontram.

QUANTO MAIS DISTANTE ESTIVER UM OBJETO, MENOR É A SUA VARIAÇÃO APARENTE DE POSIÇÃO

QUANDO É PRECISO DETERMINAR DISTÂNCIAS EXTRAGALÁTICAS, É NECESSÁRIO RECORRER A MÉTODOS INDIRETOS

Outro exemplo de vela padrão terrestre pode ser o seguinte. Suponhamos que temos à nossa frente uma fotografia que mostra muitos tipos de bolas num dado espaço e nos pedem que indiquemos qual delas estava mais próxima da câmara no momento do registo. Podemos erguer uma sobrancelha ao nosso interlocutor e dizer-lhe que a missão parece impossível, dado que pode haver bolas muito pequenas que estejam perto da câmara e bolas muito maiores longe dela. A única forma de fazer o exercício é conhecer o tamanho das bolas e compará-lo com o seu tamanho na fotografia. Contudo, se se realizar o mesmo exercício com um objeto que tenha uma propriedade padrão, invariável, como uma bola de ténis, poderemos obter uma resposta plausível. Todas as bolas de ténis têm o mesmo tamanho, pelo que saberemos que a bola maior na fotografia é a que está mais próxima da câmara e, portanto, as mais distantes são as que se veem mais pequenas.

NASA, ESA, AND THE HUBBLE HERITAGE TEAM

Imagem do *Hubble* de RS Puppis, uma estrela variável cefeida rara e luminosa situada a aproximadamente 6500 anos-luz.

Quando Hubble utilizou esta propriedade estelar, pôde estimar finalmente as distâncias a algumas nebulosas e aperceber-se de que eram corpos fora da nossa galáxia. As variações no brilho das cefeidas são bem apreciáveis para estrelas situadas a uma distância máxima de 30 Mpc. Embora abranja distâncias muito superiores às da paralaxe, este método continua a ser insuficiente para medir distâncias no universo à grande escala.

Os métodos da paralaxe trigonométrica e da variação do brilho das estrelas cefeidas são os dois únicos métodos diretos de realizar cosmografia. Por outro lado, quando é preciso determinar distâncias extragaláticas, ou distâncias no universo em grande escala, há que recorrer a métodos indiretos ou secundários, de modo a obter dados de fontes celestes mais longínquas, mas simultaneamente mais luminosas.

O primeiro dos métodos indiretos, estabelecido pelos reconhecidos astrónomos norte-americanos Brent Tully e Richard Fisher, faz uso das propriedades globais das galáxias espirais e elípticas. A relação Tully–Fisher estabelece que a velocidade de rotação de uma galáxia espiral está correlacionada com a sua luminosidade: as galáxias mais luminosas rodam mais depressa e o intervalo das velocidades orbi-

tais das suas estrelas é maior. Deste modo, galáxias muito brilhantes, cuja velocidade de rotação seja baixa, serão galáxias próximas. Por seu lado, corpos celestes muito luminosos, como os quasares, rodarão rapidamente. Até hoje, esta relação foi comprovada em centenas de galáxias — correlacionada com o desvio para o vermelho — e estabeleceu-se como um dos principais métodos de medição de distâncias extragaláticas.

O segundo método secundário utiliza fotografias galáticas e análise digital de imagem de corpos situados até 150 Mpc (~500 milhões de anos-luz). Estimou-se que, numa imagem de uma galáxia próxima, podem observar-se dez estrelas por píxel, enquanto numa distante se observam cerca de mil estrelas na mesma área. Embora, a olho nu, a diferença entre algumas fotografias não seja óbvia, um software de processamento de imagem revela diferenças notáveis. Adicionalmente, na fotografia, as galáxias próximas percebem-se mais granulosas e com um brilho superficial que exibe flutuações consideráveis, enquanto as galáxias distantes se observam mais difusas e com um brilho mais generalizado.

O método mais promissor é o do brilho máximo das supernovas do tipo Ia *SNIa*, um fenómeno tão luminoso que pode ser observado um pouco para lá de metade do nosso universo observável. As *SNIa* têm a sua génese num sistema estelar binário que possui estrelas semelhantes ao nosso Sol. No final da sua vida, as reações atómicas no núcleo da nossa estrela-mãe deter-se-ão. Então, o Sol transformar-se-á numa gigante vermelha e expandir-se-á para expelir as suas camadas externas, deixando para trás um núcleo comprimido semelhante ao tamanho da Terra, e com uma densidade milhões de vezes superior à da matéria comum. Este resíduo estelar, designado por estrela anã branca, contém átomos de carbono e oxigénio tão comprimidos que partilham os seus eletrões

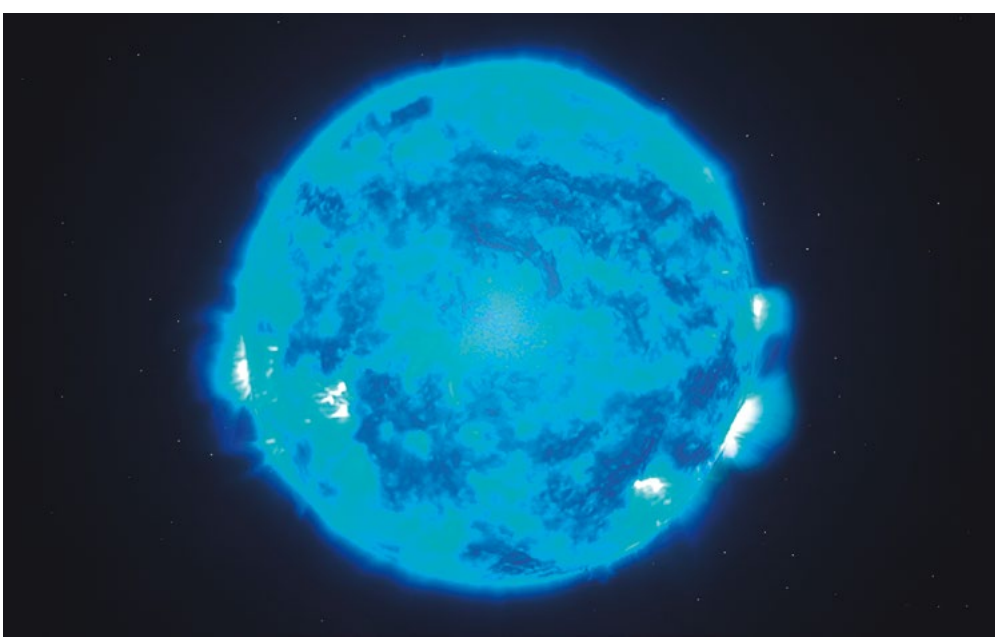
UNIVERSIDAD DE WARWICK/ MARK GARLICK

Representação de um sistema binário composto por duas anãs brancas, publicado na *Nature Astronomy* com a participação do Instituto de Astrofísica das Canárias (IAC).

e se comportam como um único gás, cuja pressão sustenta a estrela face à força de contração exercida pela gravidade, que não cessa no seu intento de continuar a comprimir o astro.

Assim, num sistema binário em que uma das estrelas se converteu numa anã branca, ocorre um fenómeno particular. Como ambas as estrelas interagem gravitacionalmente, a monstruosa força gravítica da anã branca começa a roubar matéria das camadas externas da sua irmã. Aos poucos, a temperatura e a densidade da anã branca começam a aumentar, mas a gravidade e a ausência de reações nucleares impedem que a estrela cresça. Quando a estrela atinge determinada temperatura, começa a sofrer outro tipo de reações nucleares que queimam o carbono e o oxigénio, originando elementos químicos mais pesados. Segue-se então um cataclismo termonuclear tão fascinante quanto aterrador: o processo de fusão no núcleo já não consegue suportar a pressão gravitacional e a estrela implode. Todo o gás condensado nela é projetado a cerca de 10 000 km/s em todas as direções do espaço, e a sua luminosidade supera a de toda a sua galáxia.

Como todas as anãs brancas pertencentes a um sistema binário passam pelo mesmo processo, e o colapso da estrela ocorre quando esta adquire determinada massa e temperatura, a análise da curva de luz da supernova permite conhecer a sua luminosidade máxima, que, neste caso, é sempre igual para todas as supernovas deste tipo, em todos os lugares do universo. Depois de décadas de análise astronómica, concluiu-se que o brilho desta bola de raios gama demora cerca de três semanas a atingir o seu ponto máximo e alguns meses a declinar. Caracterizou-se também que as *SNIa* mais brilhantes tendem a apresentar curvas mais suaves — tal como as cefeidas brilhantes têm períodos mais longos — e



NASA

Supergigante azul, um tipo de estrela massiva que os astrónomos associam a surtos de raios gama (GRB) ultralongos.

NOS LIMITES DO UNIVERSO OBSERVÁVEL ENCONTRAM-SE OS QUASARES, OBJETOS CELESTES DE GRANDE LUMINOSIDADE

duram mais do que as explosões fracas. Como resultado, ao possuírem uma luminosidade intrínseca dentro de limites estreitos, o seu brilho denuncia a sua distância. Não obstante, para obter dados fidedignos, os astrónomos devem calibrar a variação do fator de escala do universo — a expansão — a partir do desvio para o vermelho da estrela moribunda, o que, por sua vez, permite conhecer o tamanho e a idade do universo no momento em que a luz da *SNIa* foi emitida.

De momento, as *SNIa* são o método mais normalizado e fiável para medir distâncias em grande escala, e permitiram estimar H_0 até regiões onde as velocidades de recessão atingem ~30 000 km/s (400 Mpc ou ~1300 milhões de anos-luz), distância onde o movimento peculiar equivale a 1% da velocidade total de uma galáxia. Em abril de 2013, o *HST* detetou a SN UDS10Wil, alcunhada de supernova Wilson. Esta *SNIa* explodiu há cerca de 10 mil milhões de anos e constitui a mais distante detetada até ao momento, com z = 1914. Embora sejam fenómenos que ocorrem em fases iniciais do universo, uma das limitações é a potência dos nossos instrumentos de observação: as *SNIa* antigas apresentam um brilho 10 000 milhões de vezes menor do que Sírio, a estrela mais brilhante do céu.

Outra limitação reside no facto de as *SNIa* não serem fenómenos habituais. Ao contrário de técnicas como a relação Tully–Fisher e as cefeidas, que analisam corpos celestes sempre presentes no firmamento, em galáxias como a Via Láctea pode ocorrer uma *SNIa* a cada dois ou três séculos. Quer isto dizer que teremos de esperar séculos para ver *SNIa*? Claro que não. Tenha em conta que as câmaras de grande campo dos telescópios podem abarcar centenas de galáxias todas as noites, pelo que, estatisticamente, é possível detetar pelo menos uma ou duas por mês. Todos os dias morrem, algures no universo, anãs brancas, mas nem todos os telescópios têm a sorte de estar apontados na direção certa.

Outro método secundário para a medição de distâncias extragaláticas procura tirar partido das Supernovas do Tipo II (*SNII*), explosões de estrelas supergigantes azuis (*Blue Supergiant Stars*, *BSGs*), que possuem massas muito superiores à do Sol. Estas supernovas exibem um intervalo de luminosidade mais amplo do que as *SNIa* e, embora não sejam velas padrão por dependerem da massa da estrela, a espectroscopia das suas atmosferas em expansão e as medições fotométricas do seu tamanho angular permitem determinar a que distância se encontram, desde que esta seja inferior a 200 Mpc (~650 milhões de anos-luz).

Finalmente, nos limites do universo observável encontram-se os quasares, objetos celestes de alta luminosidade estudados desde a segunda metade do século XX. Embora as elevadas energias destes corpos lhes permitam constituir autênticos faróis nos limites do universo observável, a sua ampla gama de propriedades tem dificultado a sua inclusão como velas padrão. Não obstante, propõe-se que, com novos instrumentos como o *JWST*, será possível utilizá-los como metros cósmicos nas próximas décadas. Mais adiante falaremos deles. ■

ISTOCK

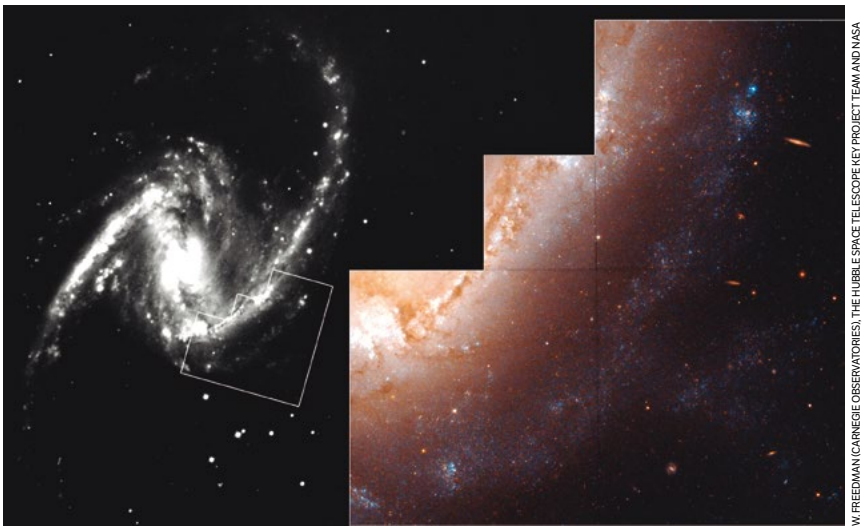
H

o parâmetro que define o infinito

Como nenhum instrumento tem a capacidade de medir distâncias absolutas no universo, foi necessário recorrer às propriedades da luz para estabelecer uma escala de distâncias cosmológicas (CDS), que define as relações de escala entre as distâncias de emissão e de receção da luz de um corpo celeste.

O ponto fulcral deste tema é um valor denotado matematicamente por H e denominado parâmetro de Hubble. Poderá encontrá-lo noutros contextos como constante de Hubble, mas, com rigor, essa designação é incorreta. Sabe-se bem que H não é uma constante: varia com o tempo. H é o fator de proporcionalidade entre a velocidade de recessão (v) e a distância (d), através da relação v = hH0d, em que h é um número adimensional que parametriza a nossa ignorância — espera-se que esteja entre 0,6 e 0,9. As dimensões de H podem exprimir-se como o inverso do tempo e, por isso, é comum vê-lo em artigos especializados como $H_0 = 72\ h\ km\ s^{-1}\ Mpc^{-1}$, embora aqui optemos por uma notação mais direta e simples: $H_0 = 72\ h\ km/s/Mpc$. Nas equações, o valor do parâmetro de Hubble que medimos atualmente denota-se por H_0.

Embora a lei de velocidade–distância pressuponha que a variação do fator de escala depende apenas do tempo — porque o universo se expande de forma homogénea —, a medição de H_0 tornou-se um dos maiores desafios para os astrónomos. O seu profundo impacto nas estimativas das distâncias extragaláticas, na idade do universo e na normalização de outros parâmetros cosmológicos fez dele um verdadeiro santo graal para a cosmologia ao longo de todo o século XX.



W. FREEDMAN (CARNEGIE OBSERVATORIES), THE HUBBLE SPACE TELESCOPE KEY PROJECT TEAM AND NASA

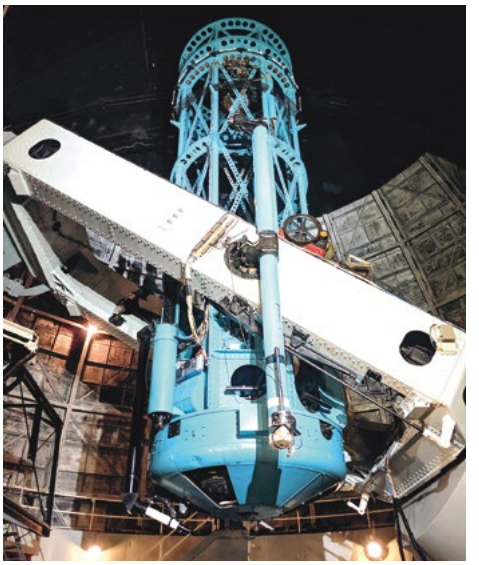
Imagem captada pelo *Hubble* que mostra uma região da NGC 1365, uma galáxia espiral barrada situada no aglomerado de galáxias de Fornax, a cerca de 60 milhões de anos-luz da Terra.

Por volta de 1930, Hubble mediu o seu parâmetro em $H_0 = 500 \pm 10$ km/s/Mpc, o que equivale a 150 km/s/al. Isto significa que, por cada megapársec (Mpc), as galáxias afastam-se de nós 500 km/s mais rápido. Contudo, hoje é sabido que as medições de Hubble eram imprecisas — talvez em demasia — devido a limitações instrumentais e a erros sistemáticos. Esse valor indicava que, se rebobinássemos o filme da expansão cósmica, todo o universo teria estado reunido na singularidade há 2000 Ma. No início do século XX, os astrónomos sabiam que tal não podia ser verdade, porque a idade da Terra, determinada por datação de elementos químicos e registos geológicos, era pelo menos mil milhões de anos superior.

Perto do final do século, as estimativas de H variavam num fator de dois, entre 50 km/s/Mpc e 100 km/s/Mpc, o que conduzia a um amplo intervalo para a idade do universo: 10 000–20 000 Ma. Com esse nível de incerteza, os modelos cosmológicos tornam-se tão abertos que afastam os cientistas de encontrar teorias concretas para descrever a evolução do universo. Para obter H com um baixo grau de incerteza, era necessário realizar várias medições a diferentes distâncias, de modo a que a média dos movimentos peculiares das galáxias fosse significativamente menor do que a incerteza na expansão do universo.

Wendy Laurel Freedman (1957-) é uma astrónoma canadiana e a primeira mulher a integrar o quadro permanente do Observatório Carnegie, em Pasadena (Califórnia), de que é atualmente diretora, bem como do Observatório de Las Campanas, no Chile. Ninguém conhece melhor do que ela o processo lento, gradual e árduo que envolve a medição do parâmetro de Hubble. Casada com o também astrónomo e seu colega Barry F. Madore, Freedman iniciou o projeto mais importante da sua vida desde que o HST foi colocado em órbita. Durante cinco anos, dirigiu o *Hubble Key Project* (HKP), um projeto astronómico internacional que procurava medir sistematicamente H_0 através de diferentes métodos, valendo-lhe vários galardões pelas suas contribuições para a determinação da escala de distâncias extragaláticas. Apesar de os seus dados remontarem a 1998, não há outros mais completos e sistemáticos.

O HKP comparou e calibrou o ponto zero de diferentes métodos de observação astronómica para obter um valor da taxa de expansão do universo com uma margem de erro não superior a 10 %. Para alcançar esta admirável façanha, o projeto definiu três objetivos principais: 1) localizar Cefeidas em galáxias espirais e medir a sua distância como ponto de calibração para os métodos secundários; 2) medir diretamente as distâncias a estrelas Cefeidas situadas em três galáxias espirais nos Aglomerados de Virgem e de Fornax; e 3) rever os erros potenciais na escala de distâncias das Cefeidas e nos métodos secundários. Como nas galáxias próximas os movimentos peculiares podem contribuir com 10–20 % da velocidade observada, o HKP optou por observar galáxias com velocidades superiores a 10 000 km/s.



SHUTTERSTOCK

O telescópio *Hooker*, de 2,5 metros, com o qual Edwin Hubble realizou a maioria das observações.

Em 1997, durante o 183.º Simpósio da União Astronómica Internacional (*International Astronomical Union*, IAU), em Quioto, Japão, a equipa do HKP apresentou os seus primeiros resultados a uma audiência de astrónomos céticos. Recorde-se que, no Simpósio da IAU de 1983, realizado na Grécia, Marc Aaronson apresentou os seus dados de H_0 como 85 ± 7 km/s/Mpc, com base na relação de Tully–Fisher; Gustav Tammann e Allan Sandage propuseram H_0 = 50 ± 5 km/s/Mpc, com base em SNIa; e Gérard de Vaucouleurs, H_0 = 95 ± 10 km/s/Mpc, com base em diferentes métodos. Não era, pois, tarefa fácil para a equipa do HKP enfrentar um grupo de cientistas insatisfeitos e pouco crentes numa medição precisa do parâmetro de Hubble. Consigo imaginar a tensão quando Freedman subiu ao estrado para a sua apresentação.

Contudo, os dados obtidos pelo HST foram tão claros e robustos que o auditório encheu-se de aplausos estrondosos, lágrimas e felicitações. Gosto de pensar que o reconhecimento mundial granjeado pelo HKP com este trabalho, assente nas variáveis Cefeidas, transcendeu o tempo e o espaço, alcançando uma estranha dimensão do passado onde uma mulher escuta, nos sussurros do vento, o som do êxito vindo de outro universo. Se, em algum lugar físico ou espiritual, Henrietta Leavitt soube da notícia, espero que se tenha sentido reconfortada e reconhecida pelo seu dedicado trabalho de observação das estrelas Cefeidas.

AS MEDIÇÕES DE EDWIN HUBBLE ERAM INEXATAS DEVIDO ÀS SUAS LIMITAÇÕES INSTRUMENTAIS

Equipa/Método	CF	SNIa	T-F	DVG	FBS	SNII	0/1
Hubble (1929)/ref. 6	500 ± 10						
Giovanelli *et al*. (1997)			69 ± 5				
Tammann y Sandage (1983)		50 ± 7					
Vaucouleurs, G. (1983)/ref. 20							95 ± 10
Aaronson, M. (1983)/ref. 20			85 ± 5				
Freedman (1998)/ref. 10			73				
Cornish y Weeks (1998)/ref. 8							65
Freedman (2000)/ref. 12		71 ± 2	70 ± 5		72 ± 9	72 ± 8	
Macri *et al*. (2006)/ref. 13	74 ± 3						
Albrecht *et al*. (2007)/ref. 18							72,8
Riess *et al*. (2009)/ref. 14	74,2 ± 3,6						
Luminet (2008)/ref. 14							62
Freedman (2012)/ref. 15	74,3 ± 2,1						
Tully et al. (2013)/ref. 16				74,4 ± 3			
Nissanke *et al*. (2013)/ref. 17							70,5 ± 5
Planck Collaboration (2013)/ref. 32		73,8 ± 2,4					67 ± 7
Wojtak *et al*. (2013)/ref. 31		73,8 ± 2,4					

Todos os dados são apresentados em unidades de km/s/Mpc
CF Cefeidas; **SNIa** Supernovas Ia; **T-F** Relação de Tully–Fisher; **DVG** Dispersão de velocidades de galáxias elípticas; **FBS** Flutuações do brilho superficial; **SN II** Supernovas Tipo II; **O/I** Outros inespecíficos.

Em 1997, pela primeira vez, os astrónomos e cosmólogos observacionais vislumbraram a possibilidade de medir, com precisão aceitável, a taxa de expansão do espaço e reduzir as incertezas acerca das distâncias e da idade do universo. As medições realizadas por dois programas informáticos independentes, DoPHOT e ALLFRAME, permitiram à equipa do HKP assegurar que as incertezas em qualquer parâmetro não excediam 15 % — na realidade, a maioria rondava os 5 %. O quadro seguinte sintetiza os resultados do HKP para os diferentes métodos, obtidos em galáxias com velocidades superiores a 5000 km/s (70 Mpc).

Método	H_0
Cefeidas	75
SNIa	71
Dispersão de velocidades de galáxias elípticas	82
Tully-Fisher	71
Flutuações do brilho superficial	70
SNII	71
Média ponderada	72

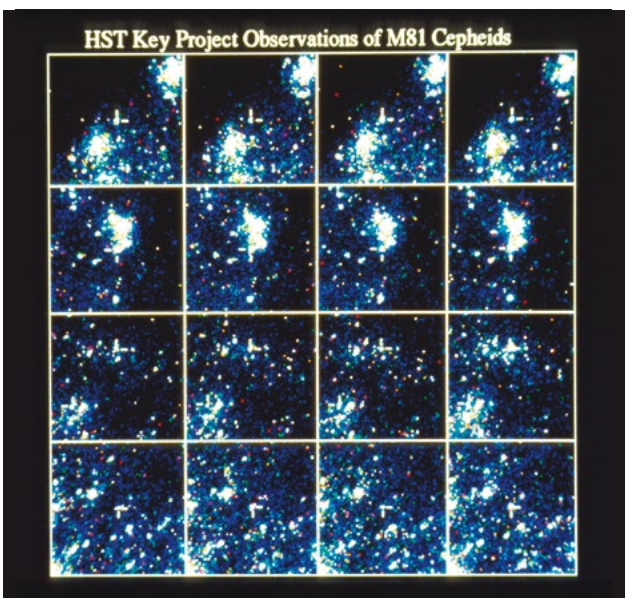
Apesar destes excelentes resultados, a busca de um parâmetro de Hubble cada vez mais preciso não cessou. Em 2006, recorrendo à *Advanced Camera for Surveys* (ACS), a bordo do HST, Lucas Macri e colaboradores mediram a distância à galáxia NGC 4258, a partir de 281 Cefeidas com períodos entre 4 e 45 dias, com o objetivo de as estabelecer como ponto de ancoragem de uma escala de distâncias extragaláticas. O seu resultado foi H_0 ~ 74 ± 3 km/s/Mpc, com as Cefeidas situadas a 48,1 kpc.

EM 1997 OS ASTRÓNOMOS VISLUMBRARAM A POSSIBILIDADE DE MEDIR A TAXA DE EXPANSÃO DO ESPAÇO

Por seu lado, o astrofísico norte-americano da Universidade Johns Hopkins, Adam Riess (1969-), comunicou em 2009 a observação de 240 Cefeidas através da *Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer* (NIC-MOS), a bordo do HST. As Cefeidas estavam distribuídas por sete galáxias, seis das quais com SNIa. Isto permitiu à equipa calibrar diretamente os picos de luminosidade das SN com elevada precisão e calcular $H_0 = 7{,}2 \pm 3{,}6$ km/s/Mpc.

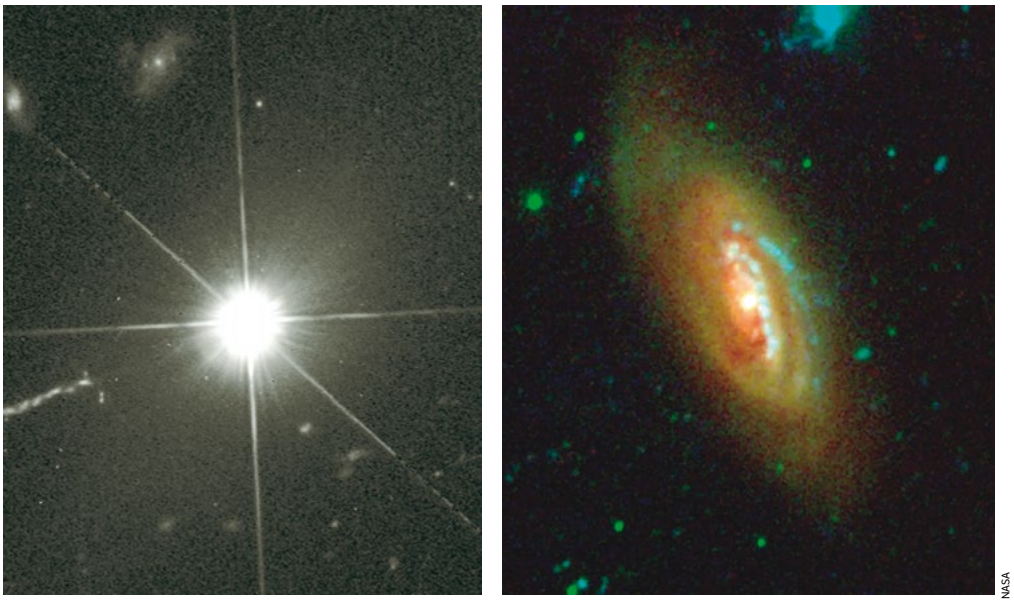
Em 2012, recorrendo ao telescópio espacial *Spitzer* (*Spitzer Space Telescope*, SST), Wendy Freedman e a sua equipa obtiveram uma nova calibração de H_0 em $74{,}3 \pm 2{,}1$ km/s/Mpc, a partir de 80 Cefeidas situadas na Nuvem de Magalhães, o mesmo enxame estelar estudado por Leavitt um século antes. Um ano depois, o *Cosmicflows-2 project* apresentou uma compilação das distâncias e das velocidades peculiares de mais de 8000 galáxias e calculou o parâmetro de Hubble em $74{,}4 \pm 3$ km/s/Mpc. Por fim, um projeto inovador que utilizou o *Advanced Ground-Based GW Detector Networks* para a análise do espetro de ondas gravitacionais obteve um resultado de $H_0 \sim 70{,}5 \pm 5$ km/s/Mpc.

É oportuno fazer uma última consideração sobre o parâmetro de Hubble. Alguns modelos cosmológicos consideram que a distribuição local de H depende de inomogeneidades e da forma como se define a posição do observador. A título ilustrativo, observadores localizados em halos de matéria escura — como nós, segundo as teorias de CDM — mediriam valores de expansão menores do que aqueles situados em posições aleatórias ou no centro de vazios cósmicos. Pode, portanto, afirmar-se que um aspeto relevante para determinar a exatidão real de H_0 é o modelo



NASA

Cefeidas em M81. Localização: o *Hubble* aponta para uma região específica da galáxia M81. Em cada quadro, vê-se uma pequena cruz branca que marca a posição de uma estrela Cefeida individual. Seguimento: cada quadro da sequência foi obtido em momentos diferentes. Medição do período: os astrónomos medem quanto tempo a estrela demora a passar do brilho máximo ao mínimo e voltar ao máximo. Cálculo da distância: existe uma relação direta entre o período de uma Cefeida e o seu brilho real (luminosidade).



NASA/ESA AND J. BAHCALL (IAS)

NASA

À esq., quasar 3C 273 fotografado pela Câmara Avançada para Sondagens (ACS) do *Hubble*. À dir., galáxia NGC 4569 captada por *GALEX*.

cosmológico de referência. A título de exemplo, os dados mais recentes da Sonda Espacial Planck (*Planck Spacecraft*, PSC) apontam para $H_0 = 67{,}88 \pm 7$ km/s/Mpc sob um modelo de CDM, valor inferior ao característico $H_0 \sim 72$ de outras medições que não consideram esse modelo.

Estes e outros estudos fizeram do HST e do SST os principais instrumentos para medir distâncias no vasto universo nas duas últimas décadas. No entanto, a tarefa continua em aberto, e a nova aposta poderá ser ainda mais exigente: estabelecer os quasares como velas-padrão.

OS LUZEIROS NOS CONFINS DO UNIVERSO

Numa noite de 1962, o radioastrónomo britânico Cyril Hazard (1928-2025) apontava o telescópio do Monte Palomar a uma região da constelação de Virgem. Imediatamente após a Lua passar diante de uma estrela azulada muito particular, o astrónomo registou um espetro de emissão e absorção que o deixou perplexo.

O mistério não demoraria a resolver-se. Nesse mesmo ano, o astrónomo neerlandês Maarten Schmidt (1929-2022) descobriu que a espetrografia dessa estrela não exibia linhas de absorção nem de emissão desconhecidas, mas sim as habituais do hidrogénio, desviadas para o vermelho em 15,8 %. Isto indicava que esse corpo apresenta $z = 0{,}158$, ou seja, afasta-se de nós a 0,158 vezes a velocidade da luz, ou 47 000 km/s.

Por esta observação, Hazard é considerado o descobridor do primeiro quasar, designado 3C273, e Schmidt é reconhecido por ter medido as distâncias aos primeiros quasares descobertos na história da astronomia. O 3C273 é, até hoje, o quasar mais brilhante no espetro ótico e é tido como uma das fontes extragaláticas mais potentes de todo o céu.

Entre 1965 e 1995, registou-se o maior número de descobertas e de catalogação de quasares, também conhecidos como radiogaláxias. São os objetos mais distantes detetados pelos astrónomos e correspondem a galáxias em fases muito iniciais de formação, caracterizadas por emitirem quantidades colossais de energia. No seu centro alberga-se um buraco negro supermassivo, com milhares de milhões de massas solares, cuja gravidade agrega o pó cósmico num disco de acreção, aquecendo-o a milhões de graus. O pico da sua emissão energética situa-se no espetro do rádio, embora emitam luz em todos os comprimentos de onda.

As descobertas anuais de novos quasares fizeram com que a distinção de objeto mais distante conhecido tenha mudado ao longo de cinco décadas, desde o 3C295, a z = 0,46, detetado pela sua emissão em ondas de rádio, até ao 8C1435+63, a z = 0,46, descoberto em 1994. Quando se pensava que não seria possível ir mais longe, recorrendo ao Telescópio de Infravermelhos do Reino Unido (*United Kingdom Infrared Telescope*, UKIRT), a equipa de investigação do astrofísico Daniel Mortlock, do Imperial College de Londres, descobriu em 2011 o ULAS J112001,48+064124,3 a z = 7,085, o quasar mais longínquo observado até à data, em 2016. Admitindo H_0 = 72 km/s/Mpc, estima-se que observamos este quasar tal como era há 12 900 Ma, quando o universo tinha apenas 700 milhões de anos, sendo esta a primeira oportunidade para explorar os 0,1 Ga de história cósmica entre z = 7,08 e 6,44.

Nesse mesmo ano, a equipa de Rychard Bouwens, das universidades da Califórnia e de Leiden, detetou também o objeto astronómico não quasar mais distante conhecido. Utilizando dados de observações obtidos ao longo de dois anos do Campo Ultraprofundo do Hubble (*Hubble Ultra Deep Field*, HUDF), encontraram o UDFj-39546284 a z = 11,9, uma galáxia composta inteiramente por estrelas gigantes azuis que se formou no cerne da época da reionização cósmica, apenas 500 Ma após o Big Bang.

A lista das descobertas astronómicas mais intrigantes sofreu várias mudanças. Em 2021, utilizando o poderoso *European Southern Observatory's Very Large Telescope* (VLT do ESO), os astrónomos fizeram uma descoberta revolucionária: uma fonte gigantesca de radiação, designada P172+18.

P172+18 é um rádio-quasar de brilho incrível, caracterizado pela emissão de enormes jatos de partículas detetáveis no espetro de rádio. A luz deste corpo celeste demorou nada menos que 13 mil milhões de anos a alcançar-nos, oferecendo-nos uma janela única para o universo primitivo. Os jatos que irrompem do centro deste quasar são propelidos por um buraco negro supermassivo, com uma massa aproximadamente 300 milhões de vezes superior à do Sol. Isto é particularmente apelativo para os astrónomos porque sugere uma forte ligação entre os potentes jatos de rádio e o rápido crescimento dos buracos negros supermassivos no universo primordial. Esta cor-

HAZARD DETÉM O TÍTULO DE DESCOBRIDOR DO PRIMEIRO QUASAR, DESIGNADO 3C273

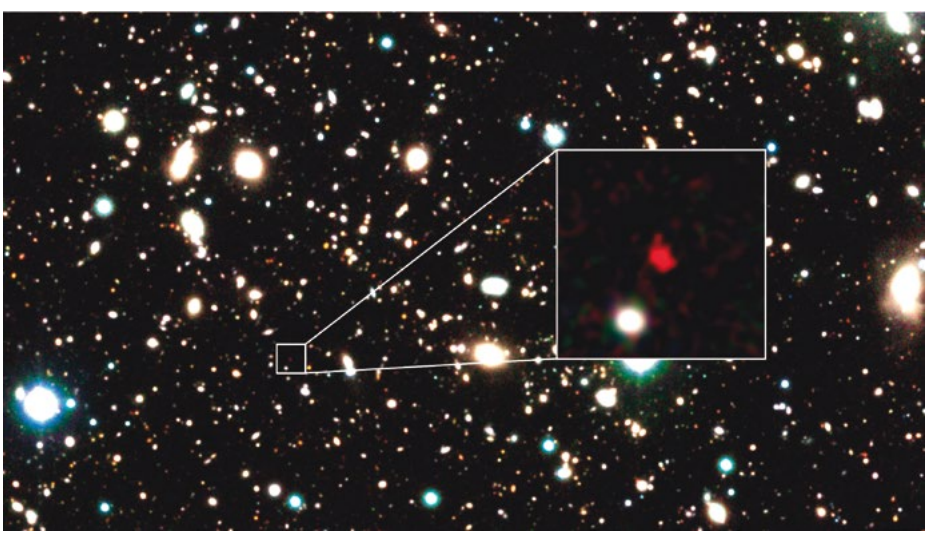
relação é especialmente intrigante, já que jatos deste tipo só foram detetados em galáxias primevas.

O estudo destes fenómenos cósmicos fornece uma fonte de informação inestimável para compreender como se formaram os buracos negros gigantescos pouco depois do Big Bang. É, sem dúvida, um desafio monumental para a cosmologia que merece atenção cuidada em futuras investigações.

As revelações entusiasmantes não ficam por aqui. O título de corpo astronómico mais distante (que não é um quasar) conhecido até à data foi atribuído à HD1. Esta descoberta notável foi feita em 2022 por uma equipa internacional de astrónomos liderada por Fabio Pacucci, do Centro de Astrofísica da Universidade de Harvard. A HD1 é uma galáxia situada a uma distância assombrosa de 13 500 milhões de anos-luz de nós.

Ao contrário dos rádio-quasares como o P172+18, a HD1 é excecionalmente brilhante no espetro ultravioleta, o que sugere que atravessa um período de intensa atividade energética. Especula-se que a HD1 possa ser composta por estrelas da «População III», também conhecidas como as mais antigas do universo. Teoricamente, estas primeiras estrelas formadas após o Big Bang seriam extremamente massivas e luminosas, emitindo grandes quantidades de luz ultravioleta. Com efeito, os astrónomos calcularam que a HD1 forma cerca de 100 estrelas por ano — uma taxa de formação estelar extremamente elevada quando comparada com galáxias maduras como a Via Láctea, que forma entre cinco e sete estrelas por ano. O seu brilho no ultravioleta, combinado com a elevada taxa de formação estelar, sugere que a HD1 é uma espécie de «viveiro» cósmico de estrelas.

Além disso, devido às propriedades destas estrelas primevas, os astrónomos postulam que a HD1 poderá conter um buraco negro supermassivo com uma massa de pelo menos 100 milhões de vezes a do nosso Sol. Some-se a isto o seu impressionante z ~ 13,2, que supera por um fator de dois o recorde anterior. A



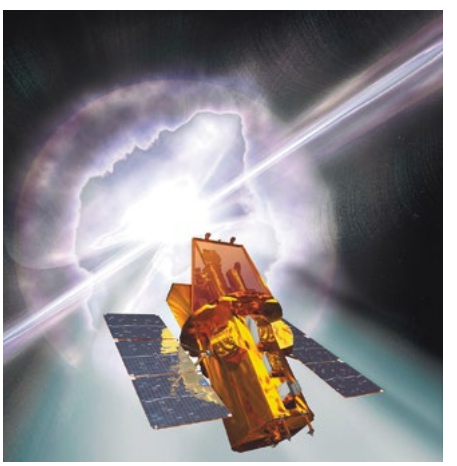
HARIKANEET AL.

Imagem tricolor da HD1, a galáxia mais distante detetada até à data (13 500 milhões de anos-luz), obtida a partir de dados do telescópio *VISTA*.

OS ASTRÓNOMOS POSTULAM QUE A HD1 PODERÁ CONTER UM BURACO NEGRO SUPERMASSIVO

luz desta galáxia viajou até nós durante a maior parte da história do universo. Para confirmar estas observações e explorar outras possíveis emissões da HD1, a equipa de astrónomos planeia voltar a observá-la com o telescópio espacial *James Webb*. Até agora, a HD1 representa o objeto mais distante que conseguimos detetar no universo e sem dúvida fornecerá pistas valiosas sobre as fases iniciais da formação galática.

O astrofísico ítalo-americano Fulvio Melia (1956-) tem dedicado os últimos anos à análise de H_0 e das distâncias extragaláticas. Este investigador considera necessária a inclusão de quasares de alto z como velas-padrão para construir um diagrama de Hubble (HD) para além de z ~ 6. Atualmente, os dados obtidos de SNIa estão limitados a z ~ 1,8; no entanto, muitos fenómenos decisivos na evolução cósmica ocorreram antes. Por isso, a sua identificação de uma correlação interessante entre a amplitude da linha de emissão de um quasar, designada CIV1549A, e o restante da sua luminosidade ultravioleta é promissora para alcançar esse objetivo.

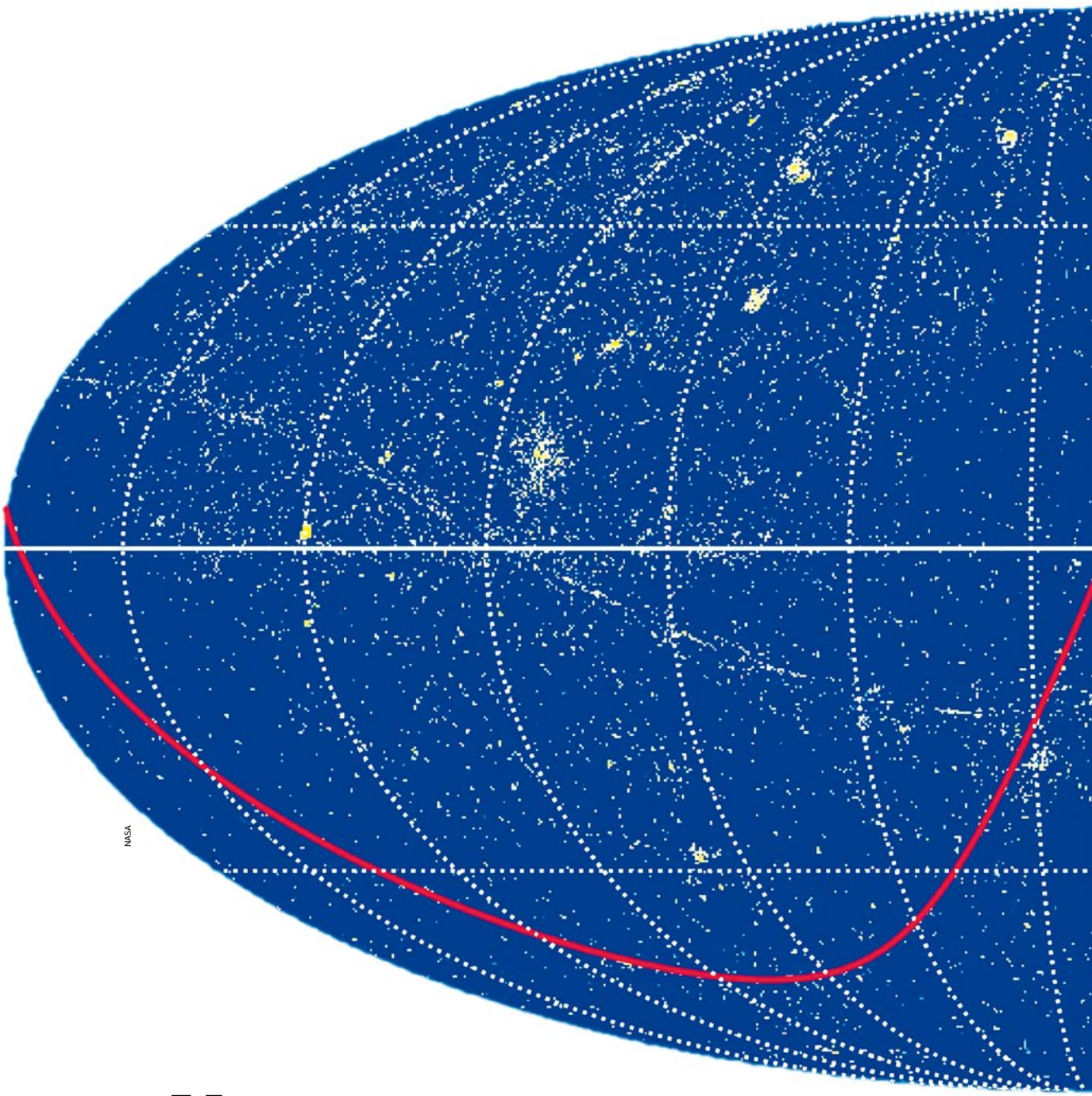


SPECTRUM ASTRO

El *Swift Gamma-ray Burst Explorer* es una misión de la NASA dedicada a investigar los estallidos de rayos gamma.

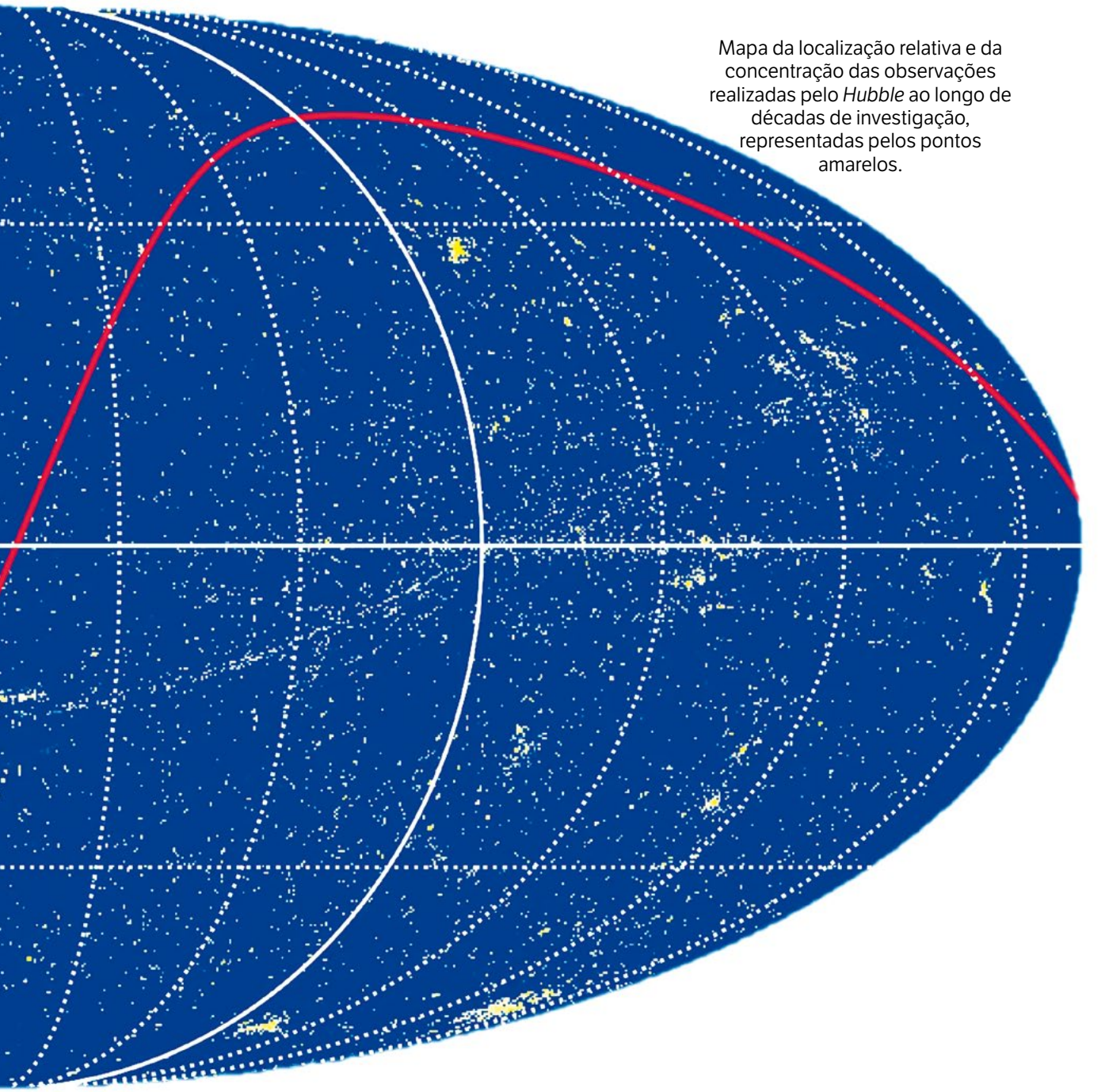
A inclusão de diversos tipos de velas-padrão é uma estratégia poderosa para restringir os modelos cosmológicos. Dois dos candidatos mais promissores são, por exemplo, as Explosões de Raios Gama (*Gamma Ray Bursts*, GRB), analisadas com a *Swift Spacecraft* (SSC), que reuniu uma base de dados impressionante desde z = 0 até z = 6; e a descoberta de padrões de curvatura da luz em nove quasares por detrás da Nuvem de Magalhães, que parecem estar diretamente relacionados com z.

Espero que o exposto lhe permita entender a importância do parâmetro de Hubble na busca por uma cidade no fim da eternidade. Num universo cuja luz nos chega esticada pela expansão do espaço-tempo, é necessário determinar a variação do fator de escala cósmica desde o momento em que foi emitida até ser detetada por astrónomos terrestres, 13 700 milhões de anos após o Big Bang. Reservar-nos-ão surpresas para lá da média de H_0 = 72 km/s/Mpc? É uma pergunta a que responderemos graças à perícia dos engenheiros, que todos os anos constroem novos e poderosos instrumentos de observação; e à argúcia dos astrónomos, que dão sentido a ténues luzes vindas de cada recanto e época cósmica. ■



NASA

Um mapa para os viajantes



Mapa da localização relativa e da concentração das observações realizadas pelo *Hubble* ao longo de décadas de investigação, representadas pelos pontos amarelos.

das estrelas

Os diferentes projetos de observação do espaço permitiram traçar um mapa preliminar da estrutura e dos limites do universo observável. Porém, é quase certo que, para lá do que os nossos telescópios conseguem captar, existem outras regiões e fenómenos por explorar. Alguns chegarão aos nossos instrumentos no futuro. Outros, pelo contrário, permanecerão para sempre fora do nosso alcance.

Enquanto trabalhou na Universidade de Cornell, o físico austríaco Wolfgang Rindler (1924–2019) contribuiu para definir dois conceitos essenciais para compreender melhor a distribuição e os acontecimentos no universo: o horizonte de partículas e o horizonte de acontecimentos.

O horizonte de partículas diz respeito a objetos físicos como galáxias, estrelas ou planetas, que ocupam uma posição específica no espaço num dado momento. Em outras palavras, este horizonte abrange todos os objetos que existem atualmente num determinado lugar do espaço. Imagine olhar o céu estrelado numa noite límpida. Cada estrela que o leitor consegue ver ocupa um lugar no firmamento e faz parte do seu horizonte de partículas.

Por outro lado, o horizonte de acontecimentos refere-se a fenómenos efémeros e transitórios que ocorrem num ponto específico do espaço durante um curto período. Estes eventos podem incluir explosões de supernovas, emissões de raios gama e outros fenómenos cósmicos de alta energia. Por exemplo, quando uma estrela se transforma em supernova, ilumina fugazmente o seu entorno antes de desaparecer. Esse clarão momentâneo é um acontecimento localizado num ponto do espaço durante um intervalo limitado.

O horizonte de partículas é o mais relevante para o desenvolvimento deste especial. Pode entender-se como a superfície interior de uma grande esfera, vista por um observador colocado no seu centro. Esta superfície não é transparente:

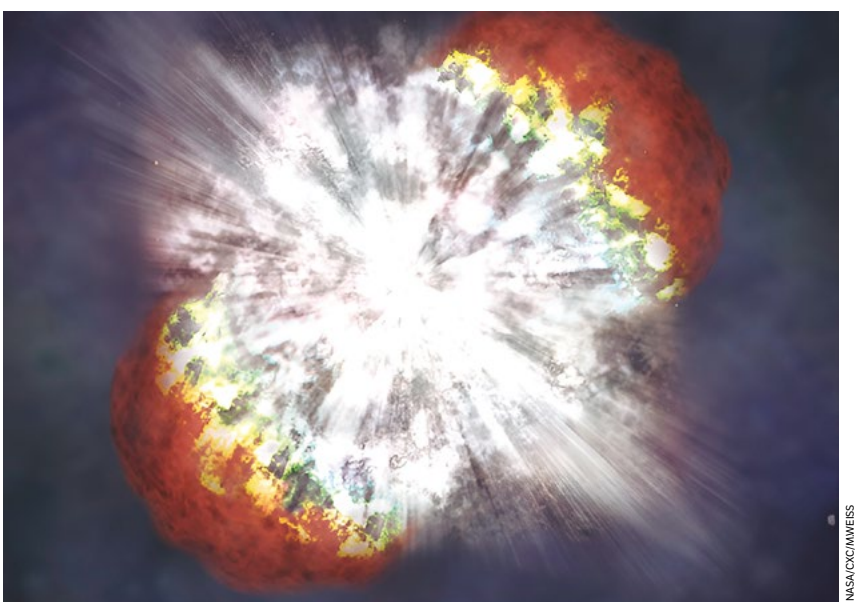


Ilustração da SN 2006gy, uma das explosões estelares mais brilhantes e energéticas jamais registadas no universo.

funciona como uma barreira que lhe permite conhecer apenas os objetos que se encontram dentro dela. Assim, o horizonte de partículas é sinónimo de universo observável, composto por ~10^{80} partículas agrupadas em estrelas, galáxias, planetas e afins. Pode também dizer-se que este horizonte corresponde à distância a que se encontra o sinal mais longínquo que podemos detetar, dado que a velocidade da luz é finita. Se o leitor apreendeu, em traços gerais, o que foi exposto até aqui, inferirá sem dificuldade que essa superfície, esse limite do nosso universo observável, é a LSS, situada a z ~1100 em todas as direções.

SHUTTERSTOCK

Um sistema estelar binário é um conjunto de dois astros ligados gravitacionalmente que orbitam um centro de massa comum.

Poder-se-ia imaginar que, por detrás desta cortina de luz, existiria uma orla do universo ou um lugar onde toda a existência termina. Contudo, por agora, o que quer que haja além disso fica fora do nosso alcance, por mais potentes e avançados que sejam os nossos telescópios. Ainda assim, se formos suficientemente astutos, poderemos transpor essa barreira não tentando observar a luz, mas sim as ondas gravitacionais.

Importa deixar claro que o horizonte de partículas não reflete necessariamente os limites do universo, mas apenas os limites do que podemos observar. Quando os astrónomos apontam os seus telescópios para qualquer ponto do céu, veem um universo que se estende de forma semelhante em todas as direções, povoado por objetos a distâncias finitas que podemos medir — o que, segundo a maioria dos cosmólogos, constitui uma pequena região de um universo maior. Não o sabemos com certeza. O certo é que, enquanto observadores, estamos no centro do nosso universo observável, o que não significa, de modo algum, que estejamos no centro do universo.

Se alguma vez mergulhou, compreenderá facilmente o conceito de universo observável; se não, é simples fazer um exercício mental. Ao submergir o suficiente, terá um campo de visão de 360º semelhante em todas as direções. Embora não exista uma barreira física, uma parede, é claro que aquilo que observa a partir da sua posição não é todo o oceano, mas apenas uma pequeníssima porção dele. Do mesmo modo, o leitor não está necessariamente no centro do Atlântico, mas encontra-se no centro do seu campo de visão de 360º.

O HORIZONTE DE PARTÍCULAS ENGLOBA OS OBJETOS QUE EXISTEM ATUALMENTE NUM LUGAR DETERMINADO DO ESPAÇO

NUM UNIVERSO ESTÁTICO IMAGINÁRIO, O HORIZONTE DE PARTÍCULAS EXPANDE-SE PROPORCIONALMENTE COM A IDADE

Façamos agora uma breve reflexão com alguns elementos já expostos. Esqueçamos por um momento que o universo está em expansão e imaginemos, pelo contrário, que permaneceu estático desde o seu nascimento. Então, se o universo tem ~13 700 ma (milhões de anos), o horizonte de partículas teria o mesmo valor. Isto significa que poderíamos observar galáxias a, no máximo, ~13 700 mal (milhões de anos-luz) de distância, já que a sua luz teria tido tempo suficiente para nos alcançar. Por sua vez, os corpos celestes que se encontrem para lá dessa distância não seriam observáveis. Agora, se imaginarmos esse mesmo universo estático quando tiver ~20 000 ma, a região observável terá crescido na mesma proporção, de forma que se poderão observar corpos celestes até uma distância máxima de ~20 000 mal. O que é que isto quer dizer? Que, num universo estático imaginário, o horizonte de partículas expande-se proporcionalmente com a idade. Os astrónomos desse local hipotético poderiam observar objetos a ~15 000 ma, que existem fisicamente neste momento — no universo de ~13 700 ma —, mas cuja luz ainda não chegou aos nossos telescópios na nossa época.

Na literatura encontrará um termo cosmológico — um horizonte — denominado Esfera de Hubble (L_H), que não deve ser confundido com o horizonte de partículas. Recorde que, segundo a lei de Hubble, o universo expande-se homogeneamente, embora, da nossa posição, não observemos todas as galáxias a afastarem-se de nós à mesma velocidade. Umas afastam-se a 1000 km/s, enquanto as que se encontram ao dobro da distância o fazem a 2000 km/s, e assim sucessivamente. A lei de Hubble estipula que, para além de uma determinada distância, designada em sua honra por distância ou esfera de Hubble, a velocidade de recessão de uma galáxia iguala a velocidade da luz. Isto quer dizer que os corpos celestes a 4166 Mpc, ou 13 583 mal, afastam-se de nós a c; os mais próximos fazem-no a uma velocidade menor, enquanto os mais distantes recuam mais depressa do que a luz. Ora, se a L_H fosse o mesmo que o horizonte de partículas, o universo observável seria infinitamente extenso num modelo estático; mas universos estáticos com idade finita têm horizontes de partículas a uma distância finita, pelo que ambos os conceitos não podem ser o mesmo — não o esqueça.

Como se vê na equação, o cálculo da L_H depende de H_0. Em muitas referências encontrará o seu valor médio em 3000 Mpc. Do mesmo modo, acima poderá encontrar a notação matemática da distância de Hubble e, se reparar com atenção, verá que é precisamente esse mesmo valor. Assim, a esfera de Hubble define-se como a distância entre o observador e o ponto onde a velocidade de recessão iguala a velocidade da luz.

Agora, deixe de imaginar um universo estático e regressemos ao universo real. Primeiro, dado que o espaço por onde viaja um fotão se expande durante o percurso, a distância atual ao sinal mais longínquo é três vezes maior do que a idade

SHUTTERSTOCK

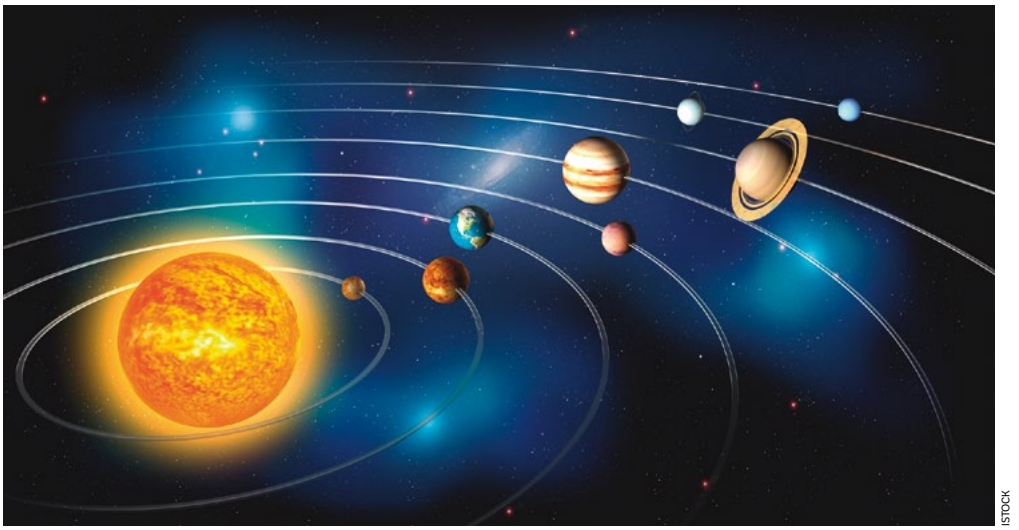
O telescópio espacial *Hubble* orbita a Terra a uma altitude de aproximadamente 600 km. A essa altura, completa uma volta ao planeta em cerca de 95–97 minutos.

do universo. Ou seja, estima-se que a barreira da LSS se encontre a ~46 000 mal. O ponto fundamental é reconhecer que a idade de um sinal não corresponde à sua distância atual, por efeito da expansão do espaço. A figura seguinte permitirá compreender a relação proporcional entre z, a idade do universo e as distâncias cosmológicas atuais.

Num universo dinâmico, o horizonte de partículas não varia apenas em função do tempo, mas também em função da expansão. Por esta razão, o universo de hoje pode exibir duas condições. Primeiro, se imaginarmos um universo cuja expansão desacelera, com o tempo poderemos observar mais galáxias, porque mais fontes entrarão no nosso cone de luz. Neste caso, o horizonte de partículas expande-se mais depressa do que o próprio universo. Pelo contrário, num universo em que a expansão acelera, a distância de Hubble não aumenta, pelo que haverá corpos celestes que ficarão para sempre fora do nosso cone de luz, impossíveis de observar. Em outras palavras, ainda que as fontes astronómicas para lá da esfera de Hubble emitam luz na nossa direção, esta nunca nos alcançará.

Esclarecido o conceito de horizonte de partículas, ou universo observável, exploremos algumas questões relacionadas com as distâncias astronómicas. Os diferentes métodos de cálculo de distâncias e da taxa de expansão do universo, somados à crescente potência dos telescópios em todo o espetro de comprimentos de onda, permitiram obter imagens cada vez mais profundas da nossa morada cósmica. Como resultado, começaram a delinear-se os primeiros mapas — esquemas preliminares que dão conta das estruturas cósmicas e da sua distribuição ao longo do espaço.

Nos últimos 25 anos, os astrónomos duplicaram a profundidade das suas observações graças aos telescópios espaciais. Na década de 1990, com telescópios terrestres, os cientistas podiam observar o universo 6 000 milhões de anos após a grande explosão. Mais tarde, a tecnologia avançada do HST e as suas imagens de campo ultraprofundas, obtidas em 2010, permitiram conhecê-lo quando tinha apenas



ISTOCK

As distâncias no Sistema Solar medem-se em unidades astronómicas (AU), que equivalem à distância entre o Sol e a Terra: 150 milhões de quilómetros ou oito minutos-luz.

1000 milhões de anos — o limite observável no espetro visível. De ver o universo a meio da sua vida, em apenas duas décadas passámos a observá-lo na infância. Até onde chegaremos?

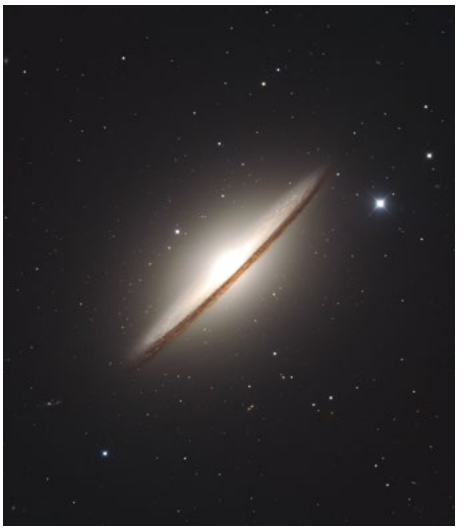
A base de dados de objetos extragalácticos é um compêndio de todos os corpos celestes descobertos dentro do horizonte de partículas e das respetivas distâncias. É, creio, um recurso que nos permite ter uma ideia da imensidão da nossa casa cósmica, dos planetas vizinhos às suas profundezas mais misteriosas.

Comecemos pelo Sistema Solar. As distâncias neste território medem-se em Unidades Astronómicas (*Astronomical Unit*, AU). Uma AU equivale à distância entre o Sol e a Terra, isto é, 150 milhões de quilómetros, ou oito minutos-luz — o tempo que a luz do Sol demora a chegar à Terra. Apesar de ser um sistema minúsculo quando comparado com a escala do universo, para nós, terrestres, as distâncias são enormes. Por exemplo, Saturno encontra-se dez vezes mais longe do Sol, a 10 AU, e Plutão a 40 AU. A luz solar demora um pouco mais de cinco horas a alcançar Plutão — bastante tempo para a partícula mais veloz do cosmos, o fotão.

Não se surpreenda: estamos apenas a começar. Para medir as distâncias às estrelas mais próximas, usa-se outra escala: os anos-luz, assinalados ao longo desta edição como «al», e «mal» para milhões de anos-luz. Por exemplo, uma das nossas vizinhas, a Estrela Polar, na constelação da Ursa Menor, situa-se a 50 al — um pouco mais de três milhões de unidades astronómicas.

Numa escala muito maior, encontramos a nossa galáxia, com uma extensão de ~10 000 anos-luz e com pelo menos 200 mil milhões de estrelas. A sua vizinha mais próxima, a galáxia de Andrómeda, está a 2,5 mal — uma estrutura a que não chegaremos a não ser que descubramos novas formas de viajar no espaço, como a propulsão warp ou os buracos de minhoca. No entanto, Andrómeda é um corpo tão próximo que não apresenta desvio para o vermelho e integra o Universo Local — demasiado local, na verdade; o universo observável para os

astrónomos andromedanos é praticamente igual ao nosso. Para escalas cosmológicas muito mais vastas, os especialistas recorrem ao desvio para o vermelho. Assim, usando uma calculadora cosmológica, verá que a galáxia M104 se encontra a z ~0,004 (55 mal) e afasta-se da Via Láctea a 1200 km/s. Mais fundo no espaço, podem encontrar-se as radiogaláxias 3C295, a z ~0,46, e 3C9, a z ~2; e, nos limites do universo observável, o Grande Telescópio das Canárias (GTC) descobriu quasares a z = 5,5 que emitiram a sua luz quando o universo tinha pouco mais de 1 000 milhões de anos.



ESO/IDA/DANISH 1.5 M/R. GENDLER AND J.-E. OVALDSEN

Messier 104 (M104), conhecida como a galáxia do Sombrero, localiza-se na constelação de Virgem.

A maioria dos corpos celestes mais distantes estudados até ao momento encontra-se a z ~6 e é detetável em comprimentos de onda superiores ao visível — no infravermelho ou em ondas de rádio. Alguns deles são o quasar CFHQS J0210-0456, a z ~6,44, e a galáxia de estrelas gigantes azuis UDFj-39546284, a z ~11,9. Neste intervalo existem milhares de objetos mais, catalogados por diferentes projetos que exploraremos dentro de instantes. Para lá disso, não existem registos observacionais diretos, à parte a LSS, a z ~1100. Nos próximos anos, espera-se explorar e catalogar, através da linha de 21 cm do hidrogénio frio, a época da reionização, a z ~20 (35 000 mal), e a Idade das Trevas entre z ~20–1000.

ALHAMBRA (*Advanced Large Homogeneous Area Medium Band Redshift Astronomical*) é um projeto espanhol que recolhe dados desde 2004 com o telescópio de 3,5 metros do Observatório de Calar Alto, do Centro Astronómico Hispano-Alemão. O seu objetivo é criar um catálogo único de fontes extragalácticas com fotometria multifiltro, graças à cobertura de um conjunto de bandas nunca antes estudadas.

Até ao momento, criou uma base de dados com mais de 500 000 corpos distribuídos por uma região do céu de 2,5 graus e, atualmente, está a iniciar a exploração de quasares a z > 5. A informação obtida pelo ALHAMBRA sobre a evolução galáctica tem favorecido a hipótese de baixo para cima (bottom-up), um modelo que propõe que as primeiras galáxias a formar-se foram as pequenas. Por meio de interações constantes, essas sementes deram origem a galáxias maiores, como a Via Láctea ou Andrómeda.

PARA ESCALAS COSMOLÓGICAS MUITO MAIORES, OS ESPECIALISTAS RECORREM AO DESVIO PARA O VERMELHO

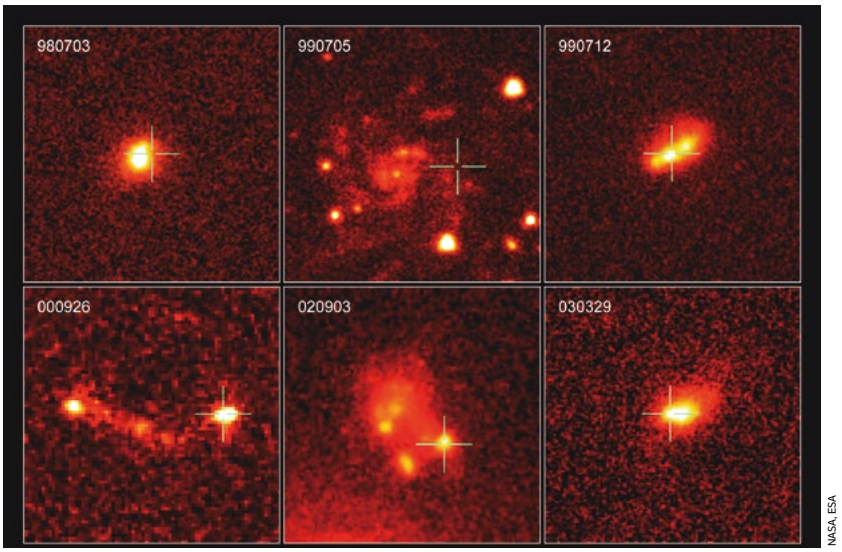


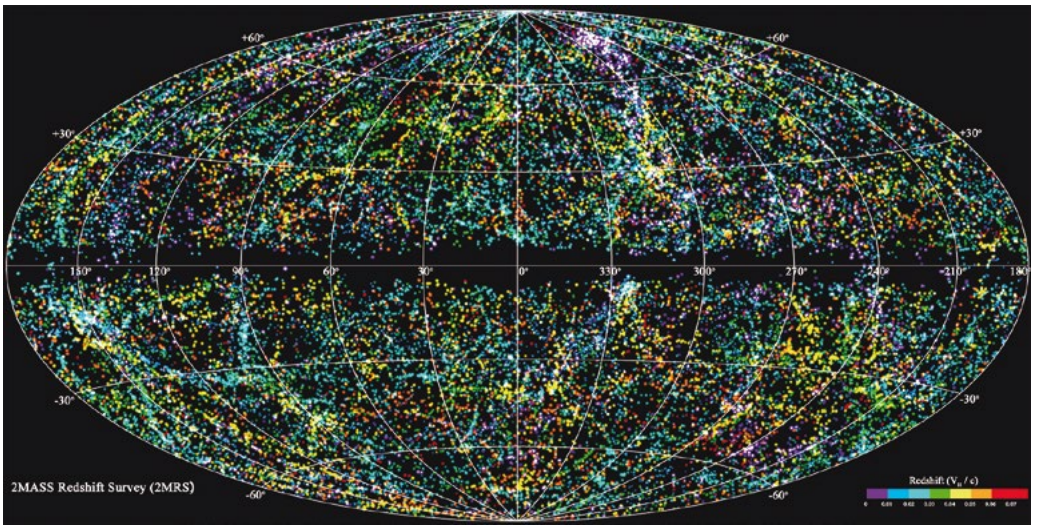
Imagem das galáxias anfitriãs de explosões de raios gama de longa duração, captada pelo telescópio espacial *Hubble* da NASA.

Muitos consideram que o projeto de mapeamento extragaláctico mais promissor é o SDSS, constituído por um grupo de 200 astrónomos e um orçamento de cerca de 70 milhões de euros. Esta iniciativa conta com um telescópio de 2,5 metros de abertura que possui dois modos de observação. Quando as noites estão límpidas, recorre-se a uma câmara de grande campo; em noites nubladas ou com Lua, obtêm-se imagens com dois espetrógrafos que permitem determinar o desvio para o vermelho de cerca de 600 objetos em simultâneo. Ao contrário de outros observatórios que repartem os seus telescópios e horas de observação por vários projetos, o SDSS dispõe de um telescópio exclusivo para realizar esta cartografia cósmica. O objetivo final é medir o desvio para o vermelho de um milhão de galáxias e quasares, como termo de comparação para os dados que serão obtidos a partir da linha de 21 cm.

Até agora, o SDSS identificou quasares para além de z = 5,7 e, recorrendo ao *Gamma-Ray Burst Hubble Diagram*, conseguiu calibrar velas-padrão entre z ~1–6. Uma das descobertas mais importantes deste projeto foi a deteção de galáxias a z ~6, uma evidência que contraria a formação galáctica tardia postulada por vários modelos cosmológicos.

Temos, pois, um esboço do universo observável. Diz-nos algo sobre a finitude do universo? Ainda não; indica apenas que podemos medir as distâncias a outros corpos celestes através de diferentes técnicas — uma atividade que nos deixou claro que o universo é imenso. Considerámos também que, embora tenhamos limitações instrumentais, no século XX os astrónomos e cosmólogos

PODEMOS MEDIR AS DISTÂNCIAS A OUTROS CORPOS CELESTES A PARTIR DE DIFERENTES TÉCNICAS



SMITHSONIAN ASTROPHYSICAL OBSERVATORY

Visualização do *2MASS Redshift Survey* (2MRS), que mostra a distribuição de mais de 45 000 galáxias. As cores indicam a distância com base no desvio para o vermelho.

observacionais realizaram avanços significativos na construção do mapa extragaláctico e da escala de distâncias. Agora, mais do que nunca, estão convictos de que dispõem de dados robustos para descartar vários modelos cosmológicos e reter alguns que terão ainda de passar outras provas.

Finalmente, quanto ao horizonte de partículas e à informação que dele podemos extrair, há uma circunstância que vale a pena expor através de uma experiência mental. Imagine que o leitor é um astrónomo com um mapa extraordinariamente completo do seu universo observável. Suponha agora que conseguiu estabelecer contacto com um astrónomo que habita um planeta vizinho. A grande maioria dos vossos horizontes de partículas está sobreposta, mas há certos corpos celestes que ele poderia ver e o leitor não — e vice-versa. Como bom inquiridor, poderia perguntar-se: porque não peço ao meu colega a informação do seu horizonte para completar o meu mapa? Embora seja um paradoxo interessante, tem uma solução simples quando se tem em conta que a velocidade máxima a que é possível transmitir informação é c. Se o leitor estiver separado do seu colega por 1 mal, por exemplo, cada um terá um horizonte de partículas de ~46 000 mal em todas as direções, mas essa pequena separação impede que ambos vejam o último milhão de anos-luz um do outro.

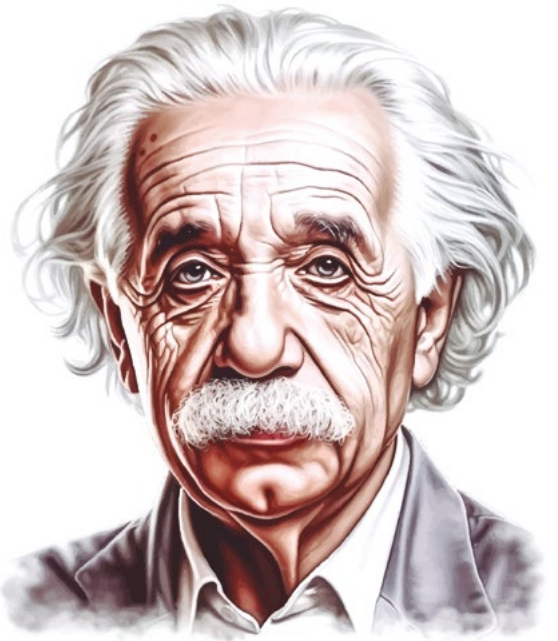
Então, o seu colega envia-lhe informação sobre a região desconhecida. Mas, devido a c, essa informação chegar-lhe-á um milhão de anos depois e, nesse intervalo, o seu universo observável terá crescido exatamente o milhão de anos-luz que lhe era desconhecido. Portanto, no momento em que receber a informação, terá decorrido o tempo necessário para que possa observar diretamente essa região com os seus telescópios. Daqui se conclui que é impossível expandir o horizonte de um observador para além do que o próprio universo fornece com o passar do tempo. A isto chama-se horizonte de informação verdadeiro, e é aplicável a todos os horizontes de partículas, em universos estáticos ou em expansão. ■

Vivemos no universo de *Asteroids*?

Se há alguns anos teve oportunidade de jogar *Asteroids*, esse jogo de computador simples e viciante em que bastava disparar e mover-se para não ser atingido por asteróides, é provável que este capítulo lhe desperte particular interesse, como me aconteceu a mim. Confesso-lhe que foi o que mais coisas novas me ensinou sobre cosmologia e do qual colhi mais ideias para repensar o meu próprio modelo de universo.

Para começar, importa distinguir entre o universo observável e o espaço físico. É possível que, ao observar algumas imagens desta revista, consciente ou inconscientemente, tenha imaginado o universo como uma esfera finita. Embora isso possa corresponder à realidade, não tem de ser assim e conduz-nos a duas perguntas que orientarão o desenvolvimento deste capítulo: o universo é finito ou infinito? e qual é a sua forma? Ao longo da história, ambas as questões foram mais filosóficas do que científicas, mas a cosmologia moderna propõe-se respondê-las.

SHUTTERSTOCK



SHUTTERSTOCK

Einstein concebia o universo como uma hiperesfera finita e estática. Porém, a descoberta da expansão cósmica por Hubble e medições modernas que sugerem um universo plano obrigaram-no a descartar esse modelo.

À partida, as observações astronómicas parecem sugerir que o espaço se estende indefinidamente em todas as direções. Contudo, muitos cosmólogos rejeitam essa noção *a priori* e admitem possibilidades adicionais. Primeira: o espaço físico é infinito. Nesse caso, o universo observável é um trecho infinitesimal do todo. Na verdade, este é um dos modelos mais apreciados pelos cosmólogos atuais, embora não seja verificável. Segunda: o espaço é finito, mas muito maior do que o que observamos. Uma circunstância semelhante ao primeiro caso, já que a esfera de Hubble impede que vejamos além para comprovar a hipótese. No entanto, se não for suficientemente grande, ou se for globalmente homogéneo e os observadores ocuparem uma posição especial, poderão encontrar-se indícios que a confirmem. Terceira: o espaço físico é mais pequeno do que o universo observável. Uma possibilidade estranha, mas sustentada por modelos de universos multiconexos em volumes pequenos e passível de verificação experimental. Por fim, o universo é tudo o que vemos. Uma ideia pouco provável e que poucos se atreveriam a defender.

Por outro lado, quanto à forma do universo, existem igualmente várias possibilidades. Einstein estava convicto de que o espaço-tempo era uma hiperesfera, uma entidade curvada positivamente, finita e sem bordas. Este postulado resolvia os paradoxos da cosmologia newtoniana — como o de Olbers — de modo tão direto que a maioria dos cosmólogos o adotou.

Contudo, a análise que alguns teóricos fizeram da teoria da relatividade conduziu a uma conclusão fundamental: a relatividade nada diz sobre a topologia do espaço, apenas indica qual pode ser a sua geometria. Para tratar da topologia é necessária uma abordagem complementar à geometria diferencial de Riemann que Einstein utilizou na relatividade geral. Não se preocupe com estes dois conceitos; em breve perceberá.

AS OBSERVAÇÕES ASTRONÓMICAS PARECEM SUGERIR QUE O ESPAÇO SE ESTENDE EM TODAS AS DIREÇÕES

De Sitter descobriu que a relatividade admitia diferentes formas para o espaço. Ele próprio obteve um universo matemático com um espaço projetivo tridimensional, ou elíptico; um espaço com a mesma geometria de um esférico, mas com topologia diferente. Não obstante, Einstein argumentou que as soluções elípticas não passavam de derivações de uma solução esférica, que deveria ser a mais provável; mais uma amostra do profundo lastro filosófico do génio.

Embora Friedmann e Lemaître sejam justamente reconhecidos como os pais da teoria do Big Bang, os seus trabalhos sobre a topologia do espaço costumam passar despercebidos. Ambos modelaram matematicamente um universo homogéneo e isotrópico, conhecido como universo Friedmann–Lemaître (FL), que admite espaços esféricos, euclidianos e hiperbólicos com curvatura constante positiva, nula ou negativa, respetivamente.

Ao contrário de Einstein, Friedmann não tinha preferência por nenhum tipo de espaço; pensava apenas que, fosse qual fosse a sua topologia, deveria ser finita. Nesse sentido, os espaços de curvatura negativa eram uma solução problemática, já que a sua topologia natural tem volume infinito. Lemaître, por seu turno, sentia-se atraído pela ideia de um espaço fechado, embora preferisse um espaço elíptico, e não esférico. Mais tarde, para sossego póstumo de Friedmann, Lemaître demonstrou a possibilidade de modelar espaços hiperbólicos com volume finito. Assim, foram os primeiros a reconhecer a importância da topologia do espaço para os modelos cosmológicos.

Atualmente, a maioria dos modelos cosmológicos baseia-se num universo FL: uma hiperesfera simplesmente conexa (*Simply-Connected*, SC), como expressão da extrapolação do princípio cosmológico. Farei, porém, o esforço de alargar esta noção e esclarecer alguns mal-entendidos.

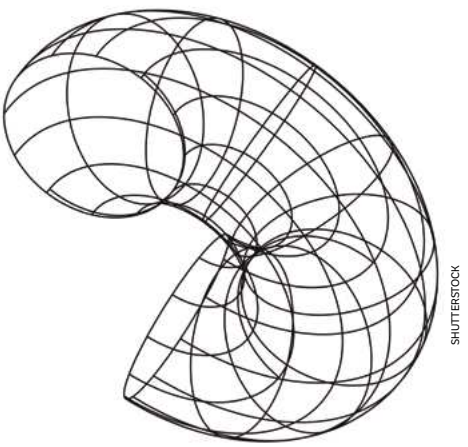
ARCHIVES LOUVAIN

LENINGRAD PHYSICO-TECHNICAL INSTITUTE

À esq., Georges Lemaître, sacerdote, astrónomo e professor de Física na Universidade Católica de Lovaina; à dir., o matemático e físico russo Alexander Friedmann.

GEOMETRIA E TOPOLOGIA DO ESPAÇO-TEMPO

A forma do universo tem dois aspetos complementares: a métrica, que lida com as propriedades da distância, como a escala extragalática que já explorámos, e a topologia, que estuda as propriedades globais do espaço sem introduzir qualquer medida. Comecemos pela ideia mais clara e direta: a forma global do espaço não depende da métrica ou da geometria, mas da topologia.



SHUTTERSTOCK

A topologia é uma propriedade que não se altera com o conteúdo de matéria/energia. Imagem de um toro topológico (acima).

É altura de nos determos nestes conceitos. A geometria é uma grandeza local que mede a curvatura intrínseca de uma superfície. O feito da relatividade geral foi relacionar a massa com a geometria. A presença de massa/energia determina a geometria do espaço-tempo, que por sua vez dita o comportamento da massa. Importa então saber que a quantidade de matéria/energia e a geometria do espaço contribuem para o valor de H. Por esta razão, quando utilizar a palavra geometria, estarei apenas a referir-me à curvatura local do espaço-tempo, característica que é descrita pelas equações de Einstein.

Por outro lado, a topologia é uma propriedade que não se altera com o conteúdo de matéria/energia e determina a forma global do espaço. Isto indica que a topologia de um dado espaço — neste caso, o nosso universo — é sempre a mesma e poderá ser identificada através dos atributos da curvatura local ou dos padrões de distribuição dos corpos celestes. Volto a enfatizar: a teoria da relatividade geral nada nos diz sobre a topologia do espaço.

Observemos agora a relação entre geometria e topologia na sua forma mais simples: um espaço euclidiano. A geometria de um espaço plano é determinada pela sua métrica, pelo que o teorema de Pitágoras basta para descrever as propriedades de um tal espaço, apesar de nada dizer sobre se a superfície é finita ou não. Por seu lado, para examinar a topologia, imaginemos que cortamos uma tira de comprimento infinito e largura finita. Depois juntamos as suas arestas e obtemos um cilindro de comprimento infinito. Nesta operação, embora não pareça, a métrica não mudou — o teorema de Pitágoras continua válido na superfície do cilindro. No entanto, obtém-se uma topologia distinta, cuja característica mais importante é a existência de um número infinito de retas que unem dois pontos distintos.

Façamos outro exercício. Imagine um retângulo que se dobra para formar um cilindro e, por fim, une os seus extremos para formar um toro plano, termo técnico para designar uma forma de rosquilha. Tal como no nosso cilindro infinito, a sua métrica é dada pelo teorema de Pitágoras, mas a sua topologia é radicalmente diferente e passa a ser uma superfície de extensão finita.

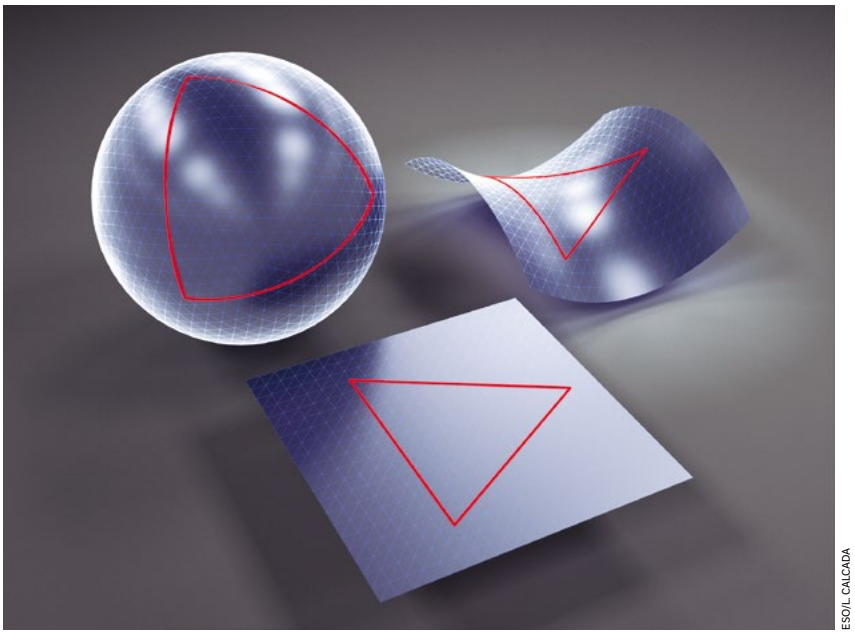
A FORMA DO UNIVERSO TEM DOIS ASPETOS COMPLEMENTARES: A MÉTRICA E A TOPOLOGIA

Deste modo, com manipulações diferentes de uma superfície plana, obtém-se um cilindro e um toro plano, formas que pertencem à família das superfícies euclidianas locais. Esta relação também pode ser entendida se considerarmos que a topologia procura classes de equivalência do espaço. Por exemplo, uma rosquilha e uma chávena de café são topologicamente equivalentes, apesar das suas óbvias diferenças geométricas.

Na maioria dos casos, as superfícies multiconexas são úteis para explicar por que razão a topologia influencia as observações astronómicas. Imagine que vive num universo multiconexo, suficientemente pequeno para que a luz o possa atravessar em apenas alguns minutos. Ao olhar numa determinada direção, a sua linha de visão curva-se através do espaço-tempo a tal ponto que, a certa altura, vê surgir uma pessoa a alguma distância da sua posição. Depois de um esforço para a identificar, tem uma grande surpresa: é o próprio visto de costas! Como é isso possível? Espere, creio que vai ver mais... sim, começam a aparecer outras cópias de si em todas as direções. Essas cópias não são clones — é você mesmo observado de ângulos diferentes; se se mover, as imagens também se moverão a seu tempo.

ESO/J. DERECHO

Representação do modelo de universo toroidal ou «teoria da rosquilha». O conceito real implica uma curvatura complexa do espaço-tempo onde o cosmos é finito mas não tem fronteiras.



O universo poderá curvar-se de diversas maneiras, mas, a olho nu, parece surpreendentemente plano. A inflação explica por que razão qualquer curvatura se aplanaria rapidamente.

Em universos multiconexos, a luz poderá tomar trajetos caóticos através do espaço e produzir múltiplas imagens de um mesmo objeto. Não seria sequer estranho que se observassem cópias infinitas. Tendo isto em conta, mesmo vivendo num universo pequeno, os habitantes de um espaço multiconexo poderiam afirmar que o seu cosmos é infinito e que contém milhões de objetos. E lembre-se: estamos a falar de uma superfície multiconexa, mas que continua a ser uma manifestação de uma topologia plana.

Interessante, não? O mais importante é apreciar a diferença entre geometria e topologia. A topologia do universo — a sua forma, volume e conectividade — é um problema fundamental que os cosmólogos ignoraram durante muito tempo. No entanto, alguns, como Jean-Pierre Luminet, Janna Levin, Neil Cornish e Laura Mersini-Houghton, de quem falaremos ao longo deste capítulo, dedicaram grande parte da sua vida a lidar com esta questão.

Posso inferir que, se tem lido textos de monstros da divulgação científica como Stephen Hawking ou Michio Kaku, se terá deparado com uma nomenclatura mais ou menos assim: forma do espaço em função do conteúdo de matéria/energia. Além disso, terá encontrado uma grandeza designada por densidade crítica (Ω), que determina uma destas formas para universos FL. Se o conteúdo de matéria/energia é igual à densidade crítica, o espaço será plano; se for maior, será fechado como uma esfera; e se for menor, será aberto como uma sela de cavalo. Acertei? Apostaria que sim. Foi exatamente o que encontrei durante dez anos. Porém, hoje posso partilhar algo distinto: essas três formas correspondem a geometrias, formas locais do espaço, e em momento algum se referem à forma global do universo. Nada exclui que o universo possa ser topologicamente de qualquer uma destas três maneiras,

mas recorde que a topologia não depende do conteúdo de matéria e energia: permanece inalterada. Assim, a topologia fica fora dos modelos FL.

Devo ainda esclarecer outra questão. Nessas mesmas obras de divulgação reconhecidas encontrará que os universos fechados são finitos, enquanto os planos ou hiperbólicos são infinitos. De um ponto de vista puramente geométrico, isto é verdade; contudo, embora os meus conhecimentos de cosmologia não se comparem com os de profissionais como Hawking ou Kaku, sinto-me na obrigação de não ignorar que esse tipo de geometria não determina, de forma alguma, a finitude ou infinitude do espaço. Tal pertence ao domínio da topologia que, entre outras coisas, pode formular universos planos ou hiperbólicos finitos. É certo que, para espaços esféricos ou hiperbólicos, a topologia determina completamente a geometria, mas espaços euclidianos geometricamente distintos podem ser topologicamente equivalentes; lembre-se da chávena de café e da rosquilha.

Se aprender isto com esta edição, dou-me por satisfeito. Raramente li um livro de divulgação em cosmologia que não se referisse erradamente a estes três tipos de geometrias como as formas globais possíveis do espaço. Vejamos agora, de forma breve, os problemas da geometria, amplamente descritos na literatura de divulgação, para depois nos debruçarmos com um pouco mais de profundidade sobre os ligados à topologia.

E^n, S^n ou H^n

A relatividade geral descreve o comportamento da matéria/energia e do espaço-tempo. Por conseguinte, os cálculos sobre a geometria do universo resultam dos componentes de matéria/energia assumidos por cada modelo cosmológico. Para determinar a dinâmica local do espaço, é indispensável conhecer algumas variáveis que suportam a evolução do universo: H_0, que representa a taxa de expansão do universo; Ómega M (Ω_M), a quantidade de massa; Ómega K (Ω_K), a curvatura do espaço-tempo; e Ómega Lambda (Ω_Λ) que indica a quantidade de energia contida no próprio espaço. Regra geral, estes valores devem ser medidos com técnicas astronómicas, embora Ω_Λ possa ser estimado teoricamente.

O primeiro parâmetro já o explorámos anteriormente, enquanto Ω_M e Ω_Λ são dimensões de densidade, e Ω_K define-se pela seguinte relação: $\Omega_M + \Omega_\Lambda + \Omega_K = 1$. Estes elementos, tão simples à primeira vista mas tão problemáticos nas observações e nas equações, determinam em grande medida como evolui o cosmos. Se voltar a usar a calculadora cosmológica da secção de recursos, verá que, para estimar a idade do universo, o ritmo de expansão e o desvio para o vermelho, entre dezenas de valores, é preciso introduzir estes três parâmetros. É claro que a calculadora lhe sugerirá alguns números para cada um,

A TOPOLOGIA DO UNIVERSO É UM PROBLEMA QUE OS COSMÓLOGOS IGNORARAM DURANTE MUITO TEMPO

mas, na realidade, são valores com uma incerteza relevante. Diga-se também que trazem implicitamente algo que já estudámos... pense no que poderá ser — sabe? Exatamente, o próprio princípio cosmológico.

Se da operação matemática de todos os ómegas se obtém $\Omega = 1$, como na equação anterior, o universo possui a densidade crítica, isto é, a quantidade de matéria/energia necessária para que seja geometricamente plano (E^n); se $\Omega > 1$ possuirá uma curvatura positiva ou esférica (S^n); e com $\Omega < 1$, uma curvatura negativa ou hiperbólica (H^n). Como bem se sabe, o universo local apresenta pequenas inomogeneidades — galáxias, sóis, planetas e regiões vazias —, de modo que, se distribuíssemos toda essa matéria pelo espaço, obteríamos um valor de três átomos de hidrogénio por metro cúbico para alcançar a densidade crítica.

Antes de 1998, acreditava-se que o nosso universo possuía uma geometria hiperbólica com $\Omega = 0 - 0{,}4$. Hoje, a maioria dos cosmólogos inclina-se para um universo com densidade de matéria/energia próxima da crítica e geometria plana. Para citar um exemplo de valores reais dos ómegas medidos em experimentos, podem considerar-se os que implicam dados obtidos das análises da CMB e que resultam em: $\Omega_K = -0{,}014 \pm 0{,}017$; $\Omega_\Lambda = 0{,}716$; ou, $\Omega_M\ 0{,}25 \pm 0{,}05$; $\Omega_\Lambda = 0{,}75 \pm 0{,}06$. Enquanto os modelos ΛCDM — modelos de matéria escura que incluem energia do próprio espaço — estimam $\Omega_M = 0{,}28$; $\Omega = 1$; ou, $\Omega = 1{,}016$; $\Omega_M = 0{,}28$. Podem encontrar-se centenas de outros dados por métodos diversos, embora a grande maioria sustente a ideia de que o nosso universo observável é plano. Embora não façam referência à topologia propriamente dita, é certo que estes dados podem restringir de forma importante os modelos topológicos, já que muitos não se ajustam a este tipo de geometria.

Por fim, vale a pena mencionar algumas previsões sobre o futuro do universo baseadas nos seus conteúdos de matéria/energia. Retomemos o modelo cosmológico do Big Bang que explorámos na primeira parte. Em geral, afirma-se que um universo hiperbólico representa a vitória da expansão, que prosseguirá sem limite por toda a eternidade. Se assim for, o universo morrerá gelado e esfrangalhado, quando todas as suas fontes de calor se esgotarem e a expansão do espaço-tempo for tão desmedida que desfará os próprios átomos (Big Freeze). Pelo contrário, pensa-se que um universo esférico favoreceria a massa e a gravidade. Assim, toda a matéria se aglomeraria pouco a pouco, com aumento da densidade e da temperatura. No final, tudo se reuniria num único ponto, algo semelhante a uma singularidade; o universo morreria quente (Big Crunch). Por outro lado, um universo plano seria o equilíbrio entre ambos os cenários; o espaço diminui a sua velocidade de expansão paulatinamente sem nunca chegar a zero. De novo, esta é apenas uma apreciação geométrica que não pode ser extrapolada para a topologia, onde pode haver universos finitos hiperbólicos ou universos fechados que se expandem para sempre.

EXISTEM ALGUMAS MOTIVAÇÕES FÍSICAS E FILOSÓFICAS PARA CONSIDERAR UNIVERSOS QUE FAVOREÇAM TOPOLOGIAS FINITAS

Janna Levin é editora-chefe de *Pioneer Works Broadcast*, diretora científica na *Pioneer Works* e professora de Física e Astronomia no Barnard College da Universidade de Columbia.

O UNIVERSO É UMA CASA DE ESPELHOS?

Falemos agora da topologia propriamente dita. Até meados da década de 1990, os cosmólogos inclinavam-se para modelos SC. Em princípio, qualquer cientista sensato poderia invocar o princípio da parcimónia para sustentar esta posição. Contudo, novas abordagens matemáticas sugeriram modelos que privilegiam espaços multiconexos e até multiversos. Só entre 1995 e 1998 escreveu-se o mesmo número de artigos sobre topologia cósmica que em todo o século XX.

Não é demais lembrar que existem motivações físicas e filosóficas para considerar universos que favoreçam topologias finitas e compactas; um universo infinito seria demasiado oneroso — tudo o que pudesse acontecer, ocorreria um número infinito de vezes. Hoje, os infinitos assustam qualquer cientista; pode até argumentar-se que se trata de um conceito matemático criado pelo homem, não de uma propriedade da natureza. Até hoje, nada foi encontrado que seja infinito — bom, talvez apenas a estupidez humana.

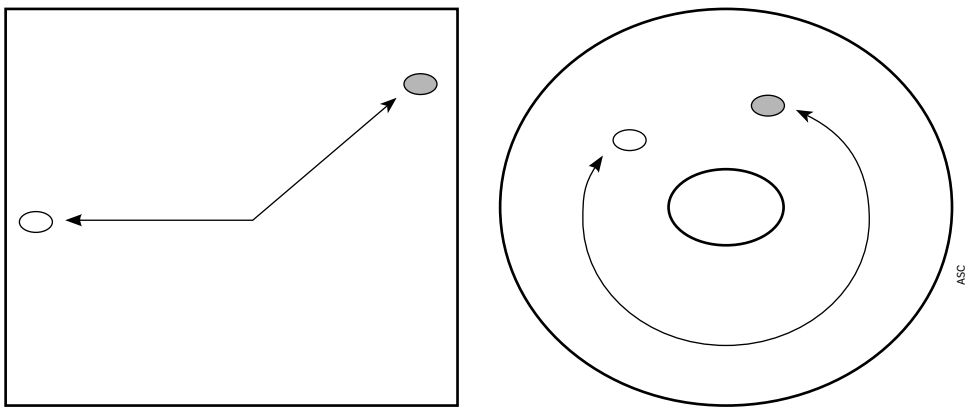
Janna Levin (1967-) é uma cosmóloga teórica norte-americana que tem dedicado a sua carreira a desenvolver modelos topológicos do universo. As suas teorias trazem à memória o clássico jogo *Asteroids*, cuja característica essencial nos pode fazer refletir sobre o espaço em si. Se a pequena nave que controlávamos se aproximava do limite superior do monitor, não encontrava ali uma barreira que a impedisse de prosseguir — lembra-se do que acontecia? Exatamente: a nave surgia na parte inferior do ecrã. Do mesmo modo, se saía pelo lado esquerdo, regressava à área de jogo pelo lado direito. Embora a nave nunca topasse com uma orla, uma barreira ou um abismo, o espaço aí era finito; o ecrã do seu computador não mede mais de 40 cm.

Levin considera que algo semelhante poderá ocorrer no universo. Embora não tenhamos detetado um limite, o espaço poderá não ser infinito, mas sim compacto e multiconexo. As fronteiras de um universo finito poderiam interligar-se em diferentes secções — recorde o exemplo do cilindro — e fazer com que o espaço se comporte como o ecrã de um computador. As primeiras estimativas apontavam para que um toro, a forma compacta mais simples do espaço, devesse ter um domínio fundamental de, pelo menos, 0,4 vezes o diâmetro do universo observável.

O pano de fundo filosófico desta proposta é, antes de mais, a existência de um único universo, o que implica que, estando nós dentro dele, não há forma de o observarmos de fora. Não há um hiperespaço ou dimensões superiores que o permitam. Porém, Levin propõe que existe uma forma de descobrir se o universo é finito e tem bordas, não viajando numa nave espacial como no nosso jogo, mas observando a luz. A ideia é simples: dois pontos que pareçam estar afastados podem, na realidade, estar próximos. Medir isto à escala terrestre é impossível, mas num universo tão vasto como o nosso o desafio é aceitável. Talvez possamos encontrar indícios de um universo com topologia de toro plano, obtido ao unir as bordas de um paralelograma.

Por outro lado, se partirmos de um retângulo plano, podemos torná-lo tridimensional unindo a parte superior à inferior e a esquerda à direita. Ao fazê-lo, obtemos um espaço tridimensional que simula as condições do nosso ecrã de *Asteroids*: poderíamos viajar até um local que aparentemente está muito longe, saindo por um lado do universo e aparecendo por outro. Isto explica como um espaço euclidiano tridimensional pode tornar-se topologicamente compacto e sem bordas, começando com qualquer paralelepípedo ou prisma hexagonal como domínio fundamental finito.

Deste tipo de espaços decorre um problema interessante para a paradoxal experiência dos gémeos proposta por Einstein, que nunca considerou um espaço multiconexo quando a formulou. A experiência mental coloca dois ir-



Topologia do espaço e artefactos observacionais. A distância medida a um corpo celeste pode ser um artefacto da topologia do espaço e do caminho que a luz tomou até ao observador. Um objeto aparentemente longínquo pode, na realidade, estar muito mais perto.

JANNA LEVIN PROPÕE QUE HÁ UMA FORMA DE DESCOBRIR SE O UNIVERSO É FINITO E TEM BORDAS

mãos gémeos a realizar um ensaio sobre a dilatação do tempo. Um fica na Terra, enquanto o outro viaja continuamente a uma velocidade próxima da da luz pelo espaço. Dadas as regras da relatividade geral, ambos julgam que o tempo do outro se dilata — uma vez que não há referencial absoluto —, então, qual deles envelhece mais? Qual deles está realmente em movimento do ponto de vista relativista? Na visão clássica, assume-se um espaço infinito de Minkowski, pelo que surge uma assimetria: sabe-se quem é o viajante, o que está em movimento, pois este tem de parar e inverter a marcha para voltar à Terra. Contudo, num espaço-tempo finito multiconexo essa solução não existe. O viajante espacial pode permanecer inercial todo o tempo, tal como o seu gémeo na Terra, e regressar ao planeta percorrendo uma geodésica periódica. Sendo ambos inerciais, qual deles permanece jovem?

SHUTTERSTOCK

O universo poderá ter uma topologia tão estranha como a de um dodecaedro, figura geométrica que consta de 12 faces.

Do meu ponto de vista, trata-se de um problema fundamental da relatividade e da cosmologia que vai muito além do que exporei a seguir. Alguns cosmólogos consideram que este paradoxo pode ser resolvido graças à existência de um referencial preferencial introduzido por uma topologia finita, no qual existe um sistema de coordenadas que permite sincronizar os relógios. Qualquer observador que se mova a velocidade constante relativamente a esse referencial sentiria os efeitos relativistas. Alguns especialistas propõem que esse sistema de referência poderá ser a LSS, um sinal que inunda simetricamente todo o espaço.

Um modelo alternativo de universo plano compacto saiu da mente de Jean-Pierre Luminet (1951-), astrofísico do Observatório de Paris, que desde 1995 combinou o seu gosto pela arte com a investigação da topologia cósmica. A sua ideia de fundo é que nada impede pensar num espaço finito que se curva sobre si próprio. Depois de explorar vários modelos, encontrou um que poderia ajustar-se a alguns padrões descobertos na CMB: um dodecaedro, figura geométrica de 12 faces que lembra, de certo modo, uma bola de futebol. O nome técnico em topologia é *Poincaré Dodecahedral Space* (PDS).

Se Luminet estiver certo, a forma do universo é muito mais complexa do que o cubo de seis faces do *Asteroids*; teria 12 faces, e se desaparecêssemos por um lado, regressaríamos por outro com uma rotação de 36°. Se o universo fosse um dodecaedro apenas um pouco maior do que a Terra, a luz poderia contorná-lo em poucos minutos e reconheceríamos facilmente várias cópias da Terra sob diferentes ângulos. Porém, se as faces do universo-dodecaedro estivessem a milhares de milhões de anos-luz de distância, os reflexos distantes e ténues poderiam ter escapado ao olhar dos astrónomos.

Luminet calcula que o raio mais pequeno do dodecaedro fundamental deverá ser de ~43 000 milhões de anos-luz, cerca de 80% do volume do universo observável. Quão versátil é esta ideia? Pois bem, alguns cosmólogos acreditam que, se o espaço físico for menor do que a esfera de Hubble, poderíamos encontrar pistas na CMB. Se for maior, talvez nunca o venhamos a saber.

As perspetivas de Janna Levin e Jean-Pierre Luminet deixam claro que os espaços multiconexos não pareceriam, à partida, muito diferentes de um SC e poderiam reproduzir grande parte das características do universo observável. Em outras palavras, as observações astronómicas não excluem a possibilidade de vivermos num universo multiconexo com topologia não trivial; apenas, por agora, a resposta escapa-nos.

À PROCURA DE FANTASMAS NO CÉU

Se efetivamente vivemos num universo multiconexo, e além disso ele é menor do que o nosso horizonte visível, poder-se-iam encontrar cópias de todos os corpos celestes que povoam o espaço-tempo; o universo poderia assemelhar-se a uma sala cheia de espelhos. Se alguma vez esteve num lugar assim, sabe ao que me refiro; se não, descrevo-lho: terá a perceção de que o espaço é infinito, que não existe limite nem borda e que tudo o que se lhe apresenta aos olhos se estende até à eternidade. Além disso, verá múltiplas imagens de si próprio, tantas quantas o número de espelhos e a sua disposição o permitirem. Poderá o céu noturno ser simplesmente um salão de espelhos, produto de topologias multiconexas? Poderão essas milhares de milhões de galáxias ser imagens fantasma de apenas alguns objetos?

O universo é tão vasto — ainda que não tão grande quanto pensamos — que a luz poderá demorar milhões de anos a percorrê-lo, de modo que as imagens fantasmáticas não se assemelhariam entre si. Façamos outra experiência, desta vez não na sua cozinha, porque vejo que ficou aborrecido com a anterior. Convido-o a um lugar que, se não for muito mais velho e tiver tido uma infância feliz, lhe será familiar. Situa-se no alto de uma torre branca onde habita um amigo meu — muitos chamam-lhe Mestre Kamisama, eu trato-o por Kam.

PODERÁ O CÉU NOTURNO SER UM SALÃO DE ESPELHOS, PRODUTO DE TOPOLOGIAS MULTICONEXAS?

SHUTTERSTOCK

Um pequeno corredor no Museu do Homem, em Paris, converte-se num espaço infinito. O universo como um quarto de espelhos — poderá a imensidade do cosmos ser apenas uma ilusão?

Consegui autorização do meu amigo para entrarmos numa sala mágica atrás de uma simples porta de madeira: a sala do tempo. Sem o leitor o saber, ocupei-me a colocar vários espelhos em diferentes posições a 10 anos-luz da entrada. Não me pergunte como o fiz — fique comigo, porque o espaço desta sala é infinito em todas as direções e, se se afastar, poderá perder-se. Aqui o tempo é especial: um ano dentro da sala equivale a um dia no mundo normal. Primeiro, ficaremos apenas alguns minutos cá dentro e, depois, sairemos. Muito bem; uma vez fora, combinamos voltar aqui dentro de 20 dias — o tempo na sala terá sido de 20 anos.

Passado esse tempo, voltamos a entrar. Pegue neste telescópio e aponte a um desses espelhos. O que observa? Sei — também eu me surpreendi da primeira vez: somos nós os dois, aqui mesmo, 20 dias atrás. Porquê? Porque esse é o tempo — 20 anos nesta sala — que a luz que emitiu demorou a chegar aos espelhos e a regressar. Incrível: graças a esta sala, estamos a ver-nos a nós próprios no passado. Se tivéssemos esperado 20 anos dentro da sala que a luz fosse até ao espelho e voltasse, agora seríamos mais velhos, mas o nosso reflexo mostraria dois jovens de há 20 anos. A chave de tudo é c.

Se consegui ser suficientemente claro com a experiência, posso extrapolar facilmente esta circunstância para o universo. Num lugar tão grande, a luz demora vários milhões de anos a ir de um ponto a outro. Assim, num espaço multiconexo, as imagens refletidas das galáxias mostrar-las-iam como eram no passado. Por exemplo, a galáxia de Andrómeda terá cerca de 11 000 milhões de anos; poderá algum dos quasares situados nos limites do univer-

NASA, ESA, AND THE HUBBLE HERITAGE TEAM (STSCI/AURA)-ESA/HUBBLE COLLABORATION

As galáxias Antennae captadas pelo telescópio espacial *Hubble*. Também conhecidas como NGC 4038 e NGC 4039.

so observável ser uma imagem mais jovem dessa mesma galáxia? As galáxias Antennae, a 70 milhões de anos-luz, são a amostra de uma colisão galática no passado. Poderá isto ser uma imagem da formação da nossa própria galáxia? Descobri-lo é o desafio dos cosmólogos decididos a pôr à prova as teorias de um universo multiconexo.

Adicionalmente, num espaço multiconexo, a luz emitida pelas fontes astronómicas pode reunir-se ao longo de mais do que uma geodésica, pelo que a imagem poderá chegar ao observador por vários caminhos. Se assim for, o mapa do céu mostraria não apenas a fonte em diferentes períodos da sua evolução, mas também várias vezes no mesmo momento, sob ângulos distintos. Como poderão os astrónomos reconhecer este padrão? Antes de mais, é preciso assumir que o universo é suficientemente pequeno para que a luz tenha tempo de chegar ao observador a partir de múltiplas direções.

Embora seja um desafio interessante, encontrar imagens fantasma no firmamento tem limitações. Primeiro, a deteção de luz proveniente de direções distintas torna muito difícil o seu reconhecimento como um único objeto, dadas as enormes semelhanças entre corpos celestes. Segundo, algumas regiões ou fontes cósmicas, como nuvens de hidrogénio, poderão obscurecer ou esconder as múltiplas cópias. E por fim — já o referi — duas imagens de um único corpo celeste a diferentes distâncias correspondem a dois períodos da sua evolução, o que dificulta a sua correlação.

Um primeiro método para identificar um espaço multiconexo é tratar estatisticamente as imagens de diferentes fontes astronómicas. Esta abordagem tem a vantagem de não depender da morfologia dos corpos celestes nem do olhar para o passado, baseando-se antes nas correlações entre posições e distâncias

das imagens. Um deles é a cristalografia cósmica, utilizada para construir histogramas de separação de pares. Este método avalia funcionalmente a distância entre pares de imagens de um catálogo e representa-as por intervalos. Em outras palavras, se o universo for pequeno e a sua luz nos tiver cruzado várias vezes, poder-se-ão observar imagens múltiplas da mesma fonte, com direções e z previsíveis. Contudo, é necessário complementar ainda mais os catálogos de fontes de alto z, com projetos como o ALHAMBRA. A limitação mais importante deste tipo de análise é não ser adequado para detetar topologias planas ou hiperbólicas, apenas alguns tipos de topologias esféricas complexas — não tão simples como a hiperesfera de Einstein.

A cristalografia cósmica serviu de base para um método promissor, o *Collecting Correlated Pairs Method* (CCP), que utiliza sobretudo a isometria — preservação da distância entre pares de imagens — e a posição tridimensional das fontes cósmicas. No entanto, os astrónomos aperceberam-se de que as incertezas nos valores de Ω_M e Ω_Λ, desvio para o vermelho e velocidades peculiares das galáxias tornavam a tarefa quase impossível.

Mais promissor para encontrar indícios sobre a topologia cósmica é a análise da CMB. Em primeiro lugar, se o espaço tiver uma topologia especial, poderão descobrir-se vestígios no padrão de distribuição de pontos frios e quentes. Estima-se que, num universo infinito, os pontos possam estar distribuídos aleatoriamente, ao passo que, num finito, deverão existir padrões distintivos. É sabido que a distribuição das inomogeneidades da CMB — as pequenas diferenças de temperatura — depende da topologia do universo, pois está condicionada pelos limites ou bordas. É uma situação análoga ao som de um tambor, que varia segundo a composição das suas margens; um tambor com bordas esféricas soará de modo diferente de um com bordas dentadas. Neste quadro, uma análise de frequências da CMB, ou a deteção de geodésicas radiais no sinal, poderá fornecer pistas para identificar a forma global do espaço.

Um terceiro método foi desenvolvido por Neil Cornish, cosmólogo da Universidade Estadual de Montana, que fez contribuições importantes aos modelos de topologia cósmica. Interessado em relatividade geral e no universo primordial, grande parte do seu trabalho deriva da análise da CMB. Tão depressa Luminet e Levin publicaram as suas ideias, físicos como Cornish começaram a procurar sinais do salão de espelhos ou do PDS. *Matched circles pairs* (MCP) é um método que procura padrões de distribuição de pontos na CMB, qualquer que seja a topologia posta à prova. Por exemplo, a teoria do PDS prevê que se devam encontrar seis pares de círculos antipodais, com os mesmos padrões de temperatura, no sinal da LSS. Esta busca implica considerar cada ponto do espaço como centro de um círculo com raio entre 0 e 90°, a comparar com uma região homóloga para identificar correlações.

EMBORA SEJA UM DESAFIO INTERESSANTE, ENCONTRAR IMAGENS FANTASMA NO FIRMAMENTO TEM LIMITAÇÕES

NASA, ESA, ESO, CXC & D. COE (STScI)/J. MERTEN (HEIDELBERG/BOLOGNA)

Imagens de Abell 2744 obtidas pelo *Hubble* e pelo *Very Large Telescope* do Observatório Europeu do Sul, com dados de raios X do observatório Chandra.

Cornish definiu o raio de curvatura como $R_0 = H_0^{-1}/\sqrt{1 - \Omega_0}$, a escala de comprimento onde se esperaria encontrar a primeira evidência de que vivemos num universo multiconexo. A equação não é o essencial; retenha apenas que nela intervêm parâmetros como H_0 e Ω_0 que já estudámos.

No princípio, este método indicava que as imagens especulares da Via Láctea deveriam estar pelo menos a 15 Mpc (48 milhões de anos-luz). Porém, uma análise posterior dos enxames de Abell e de Coma sugeriu que a escala topológica deveria ser de, pelo menos, 60 Mpc, enquanto a análise do Superaglomerado da Virgem a estendeu a 200 Mpc. Alguns anos depois, Luminet e colaboradores estimaram α — a circunferência mínima possível — em 10 Mpc, e β — a máxima — em 100 Mpc. Por sua vez, quando Janna Levin analisou a CMB em busca de pistas de alguma entre seis topologias compactas determinadas, concluiu que, se o universo é finito e plano, deverá ser 40% maior do que o diâmetro da LSS, se $H_0 = 100$ km/s/Mpc. As diferenças nestas estimativas refletem, a título de exemplo, a incerteza deste cálculo.

Quando Cornish e a sua equipa aplicaram a MCP à análise da CMB, afirmaram não ter encontrado qualquer rasto de um universo multiconexo. Mais tarde, uma equipa do Torun Centre for Astronomy, na Polónia, publicou os resultados da sua própria análise utilizando o mesmo método para círculos menores. O seu resultado mais relevante foi a descoberta de seis pares de círculos com tamanho angular de ~11º, distribuídos num padrão de dodecaedro, de acordo com $\Omega_0 = 1{,}010 \pm 0{,}001$ e $\Omega_\mu = 0{,}28 \pm 0{,}02$. Na altura, isto foi um forte impulso para o modelo PDS de Luminet e abalou a comunidade científica. Parecia que, afinal, o universo tinha uma forma estranha, que poucos se tinham atrevido a imaginar.

Todavia, um grupo da Universidade de Ulm, na Alemanha, dirigido por Ralf Aurich, analisou o mesmo sinal da equipa polaca e concluiu que estava degradado por vários efeitos, de tal modo que a teoria de Luminet não podia ser confirmada

nem refutada. Mais tarde, em 2013, o mesmo grupo reportou um sinal positivo para MCP tão perto do plano galático que não é possível discernir se constitui uma prova contundente de uma topologia não trivial ou um efeito do ruído. Por outro lado, os dados dos sete anos do WMAP sugerem que a CMB não contém MCP nem suporta, a partir do horizonte observável, modelos de universo multiconexo.

Embora a prova de uma topologia cósmica esteja mais distante do que se pensou inicialmente, as análises da CMB têm sido úteis para determinar os possíveis mínimos e máximos da extensão do universo. Em 1970, por exemplo, as observações galáticas levaram a considerar que o limite do espaço físico era 500 Mpc. Em 1996, com dados do COBE, postulou-se que deveria ser de 3000 Mpc (9000 milhões de anos-luz), para topologias planas, e 6000 Mpc (19 500 milhões de anos-luz) se fosse hiperbólico. É importante ter em conta que estas estimativas dependem fortemente dos parâmetros cosmológicos já expostos. Em 1997, para $\Omega = 0{,}3$, a escala topológica mais próxima deveria situar-se entre $z = 0{,}9 - 2{,}9$; enquanto para $\Omega = 0{,}4$ ficaria em $z = 1 - 3{,}8$. Porém, recorde-se que, nessa data, com os dados do COBE, as observações favoreciam um universo de curvatura negativa com $\Omega = 0{,}3 - 0{,}4$, pelo que a escala topológica e a curvatura estavam relacionadas com modelos hiperbólicos.

Mais adiante, com dados do WMAP, SDSS, 2dF Survey e SNIa, entre outros, concluiu-se que não poderíamos viver num universo com escala topológica inferior a 25 Gpc, isto é, 78 000 milhões de anos-luz. Ao mesmo tempo, a balança inclinou-se a favor dos espaços euclidianos e de alguns esféricos e, embora ainda seja possível sustentar, em teoria, 18 tipos de espaços multiconexos — oito com volume infinito e, dos dez restantes, seis hipertoros finitos —, o seu raio de curvatura situar-se-ia para além do universo observável, pelo que o espaço pode ser considerado plano para todos os efeitos. Dito de outro modo, assim como um topógrafo pode obter medidas de curvatura nulas ao medir um terreno de 10 km, apesar de a Terra ser redonda, o nosso universo é tão grande que, para todos os efeitos práticos, é plano.

Espero que este caminho em busca da cidade no fim da eternidade lhe tenha sido gratificante e que tenha encontrado novos dados sobre o nosso universo. Neste momento, a cosmologia observacional é uma das áreas mais frutíferas da ciência, mas também uma das mais árduas. Embora não seja astrónomo nem cosmólogo de profissão, imagino bem a dificuldade. Na minha profissão, também me dedico a cartografar milhares de luzes que não surgem num telescópio, mas sob um microscópio. A quantificação da fluorescência de neurónios e proteínas pode ser tão laboriosa quanto a contagem e análise de objetos extragaláticos; por vezes, parece uma tarefa infinita.

Compreender como se medem distâncias no universo permite ter uma imagem clara das limitações ao empreender a determinação da finitude do espaço. Para lá da barreira observacional imposta pela LSS, nenhum dos métodos que explorá-

COMPREENDER COMO SE MEDEM DISTÂNCIAS NO UNIVERSO PERMITE TER UMA IMAGEM CLARA DAS LIMITAÇÕES

mos nesta secção chegou a um limite, a um lugar que sugira a existência de uma borda ou barreira cósmica. Pelo contrário, continuam a descobrir-se mais e mais corpos celestes quanto mais longe os astrónomos tentam olhar. Por outro lado, um universo que aumenta continuamente de tamanho e que nos oferece uma janela para o passado complica ainda mais este exercício de medição.

É entusiasmante perceber como os cientistas se têm desdobrado para cartografar o cosmos e apresentar-nos a composição e as estruturas do universo em grande escala. Posso dizer também que o universo em grande escala não difere significativamente dos neurónios que vejo quotidianamente ao microscópio, o que me conduz à fantástica ideia de que temos um cosmos dentro da cabeça.

Sugiro que visite os recursos de mapeamento extragalático citados nesta secção. Na internet encontrará imagens e vídeos que complementam significativamente o exposto sobre a escala de distâncias extragaláticas e, sobretudo, lhe darão acesso a informação valiosa sobre os resultados mais recentes nesta linha de investigação. Semana após semana recolhem-se novos dados com potencial para modificar modelos de evolução cósmica que prevaleceram durante décadas.

Do mesmo modo, espero que este traço sobre questões de topologia e geometria cósmica lhe tenha permitido conceber uma ideia mais ampla e certeira do plano, do esférico e do hiperbólico. Embora a ideia grega, aristotélica, de um universo finito tenha sido amplamente aceite na Europa medieval e implicasse a noção devastadora de uma borda ou limite, agora podemos pensá-la sob outra perspetiva enquanto jogamos *Asteroids*.

Por outro lado, muitos teóricos sustentam que, se alguma vez se alcançar a tão desejada fusão entre a relatividade e a mecânica quântica, a topologia cósmica virá por acréscimo. Como explorámos anteriormente, um aspeto dessa teoria hipotética é a capacidade de prever o comportamento de dimensões adicionais, tanto das que colapsaram à escala de Planck como de outras, de curvatura negativa, que terão crescido até escalas macroscópicas. Em outras palavras, uma ToE poderá colocar-nos perante topologias que ainda nem imaginamos.

Devo salientar também que o problema da entropia, longamente debatido e estudado por um dos meus cosmólogos favoritos, Roger Penrose, requer necessariamente uma explicação dinâmica da topologia do espaço-tempo. A pergunta sobre a entropia exige saber se o espaço contém uma quantidade infinita de matéria/energia. A homogeneidade implica uma distribuição uniforme de matéria/energia pelo espaço, de modo que, se fosse infinita, encontraríamos em qualquer lugar quantidades infinitas de energia; um pequeno pedaço de espaço conteria a mesma energia que o universo no seu todo — a não ser que se determine que a energia de Planck é o montante máximo capaz de alojar-se no comprimento de Planck. Embora este seja um problema de importância fundamental, sai fora dos objetivos desta edição, mas proporei a mim próprio considerá-lo num futuro próximo.

OS LIMITES OBSERVÁVEIS DO UNIVERSO SÃO TÃO LONGÍNQUOS QUE NUNCA OS PODEREMOS VISITAR

THE AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS/ NOBEL FOUNDATION

Max Planck foi físico e matemático alemão, galardoado em 1918 com o Prémio Nobel da Física (recebido em 1919). É reconhecido mundialmente como o pai da física quântica.

Por fim, consistente com a crença de que não ocupamos um lugar privilegiado, poder-se-ia dizer que também o universo não deverá conter uma topologia especial. Apesar disso, um espaço topologicamente finito introduz uma nova consideração copernicana: se não somos o centro geométrico do universo, outra galáxia poderá sê-lo; um universo finito e compacto deve ter um centro geométrico que, note-se, não é de modo algum o «lugar» onde ocorreu a grande explosão. Do mesmo modo, mesmo que não vivamos no seu centro, poderíamos estar num referencial preferencial relativamente à expansão cósmica.

Poderão as observações astronómicas mostrar-nos um limite entre o nosso universo e outros tantos que flutuam no hiperespaço? Talvez, dentro de alguns anos, o saibamos com segurança. Por agora, o certo é que considerar outros universos amplia ainda mais os problemas que os cosmólogos têm apenas com o nosso. É um desafio estimulante, mas tão longínquo que, do meu ponto de vista, é melhor mantermos os pés aqui.

Enquanto escrevo isto, pergunto-me: por que razão nos devemos preocupar com a forma e o tamanho do universo e formular hipóteses sobre a sua finitude? Os limites observáveis do universo são tão longínquos que nunca os poderemos visitar e não temos vida suficiente para viajar através do vasto oceano cósmico. O que me ocorre de imediato é que a minha pergunta reflete os mesmos pensamentos de pessoas do século XVII que consideravam inútil perguntar pelo tamanho, natureza e composição da Lua, se, afinal, ela apenas ali estava e não podíamos lá chegar... Do coração, penso que o que torna o ser humano tão especial — e sim, creio que é especial de algum modo — é a sua capacidade de apagar limites e propor novos horizontes. ■

BIBLIOGRAFIA

❏ CALVALCANTI, PAULO S. *Horizontes cósmicos: explorando os grandes misterios do universo*. Saber mais, 2024.

❏ CARDOSO, JONATHAN. *Nós e universo: a astronomia*. Saber mais, 2018.

❏ CLEGG, BRIAN, *Dark Matter and Dark Energy: The Hidden 95% of the Universe*, Londres, Icon Books, 2019.

❏ COX, BRIAN EDWARD e FORSHAW, JEFFREY ROBERT, *Black Holes: The Key to Understanding the Universe*, Londres, HarperCollins, 2022.

❏ CROSWELL, KEN, *The Alchemy of the Heavens. Searching for Meaning in the Milky Way*, Nova Iorque, Doubleday, 1995.

❏ CROSWELL, KEN, *The Lives of Stars*, Honesdale (PA), Boyds Mills Press, 2009.

❏ DE FREITAS MOURAO, RONALDO ROGELIO. *O livro de ouro do universo*. HarperCollins, 2019.

❏ DE GRASSE TYSON, NEIL. *Ao infinito de além*. Record, 2026.

❏ GREENE, BRIAN. *O tecido do cosmos.* Gradiva, 2006.

❏ GRIBBIN, JOHN R., *Galaxies: A Very Short Introduction*, Oxford, Oxford University Press, 2008.

❏ KINNEY, WILLIAM HENRY (WILL), *An Infinity of Worlds: Cosmic Inflation and the Beginning of the Universe*, Cambridge (MA), MIT Press, 2023.

❏ HAWKING, STEPHEN. *Uma breve história do tempo*. Gradiva, 2000.

❏ LASZLO, ERVIN. *Cosmos*. Cultrix, 2011.

❏ LEVIN, JANNA, *How to Survive a Black Hole*, Madrid, Editorial Pasado y Presente, 2017.

❏ MACK, KATHERINE J. (KATIE). *O fin de todas as coisas*. Objetiva, 2022.

❏ MANRIQUE CASTAÑO, DANIEL, *Fundamentos de cosmología, la ciencia del universo*, Córdoba, Guadalmazán, 2024.

❏ MEE, NICHOLAS, *The Cosmic Mystery Tour: A High-Speed Journey Through Space & Time*, Oxford, Oxford University Press, 2019.

❏ MERSINI-HOUGHTON, LAURA, *Before the Big Bang*, Londres, Bodley Head, 2022.

❏ NOVELLO. MARIO, *Caminhos da cosmologia. Uma introduçao contemporânea a seus principais conceitos, teorias e potencialidades*. Lf Editorial, 2026.

❏ PAGE, LYMAN, *The Little Book of Cosmology*, Princeton, Princeton University Press, 2020.

❏ PANEK, RICHARD, *The 4 Percent Universe*, Nova Iorque, Houghton-Mifflin-Harcourt, 2011.

❏ PAULUCI, L. , MORAES, P. H. R. S. , HORVATH. J. E. , *A cosmologia na sala de aula. LF Editorial. 2022.*

❏ REES, MARTIN J., *Just Six Numbers*, Nova Iorque, Basic Books, 1999.

❏ RODRIGUES DOS SANTOS, JOSÉ HAMILTON. *Tópicos en cosmologia com campos escalare*s. Novas Ediçoes academicas, 2015.

❏ SACROBOSCO, JOAO DE. *Tratado da esfera: cosmología tradicional e mecanica celeste.* Biblioteca de artes liberais, Concreta, 2019.

❏ SAGAN, CARL. *Cosmos*. Companhia das Letras, 2017.

❏ SEEDS, MICHAEL A. e BACKMAN, DANA, *Horizons: Exploring the Universe*, Boston, Cengage Learning, 2018.

❏ SMITH, WOLFANG. *A sabedoria da antiga cosmologia.* Vide Editorial, 2025.

❏ SPARKE, LINDA S. e GALLAGHER, JOHN S. III, *Galaxies in the Universe: An Introduction* (3ª ed.), Cambridge, Cambridge University Press, 2020.

❏ WHEELER, J. CRAIG, *Cosmic Catastrophes: Supernovae, Gamma-Ray Bursts and Adventures in Hyperspace*,Cambridge University Press, 2000.

❏ ZABOT, ALEXANDRE, AMARANTE, MARCOS. *Introduçao a cosmologia moderna*. LF, Editorial. 2023.

❏ ZABOT, ALEXANDRE, AMARANTE, MARCOS. *Astrofisica moderna: fenomenos e conceitos.* LF, El. 2025.

❏ ZAMPOLI, MARCELO. *A teoria do cosmos quântica.* Saber mais, 2022.

SHUTTERSTOCK

SUPER INTERESSANTE

REDAÇÃO
Diretora: **Cristina Enríquez** (cenriquez@zinetmedia.es)
Coordenação de design:
Óscar Álvarez (oalvarez@zinetmedia.es)
Redação: **Carmen Castellanos**
Muy Interesante Digital:
Christian Pérez (cperez@zinetmedia.es)

Autor dos textos: **Daniel Manrique.**
Texto original: *Fundamentos da cosmologia, a ciência do universo*. Editorial Guadalmazán (Almuzara).
© Talenbook, s.l., 2016. © Daniel Manrique Castaño, 2016
© de las ilustraciones: Julián Restrepo Peña
Colaboradores: **Javier Alvaredo** (edição),
Manuel Arrubarrena (layout e documentação).
Revisão portuguesa: **Tempus Art**

zinet MEDIA GLOBAL

REDAÇÃO EM MADRID
C/ Alcalá 79 1º A - 28009 Madrid; tel.: 810 58 34 12
Subscrições: suscripciones@zinetmedia.es
Consultora: **Marta Ariño**
Diretor Geral Financeiro: **Carlos Franco**
CRO (Diretor Comercial): **Alfonso Juliá** (ajulia@zinetmedia.es)
Brand Manager: **Marta Espresate** (mespresate@zinetmedia.es)

DISTRIBUIÇÃO
VASP – Distribuição e Logística, S.A.
A Super Interessante é uma publicação
registada na Entidade Reguladora
para a Comunicação Social com o n.º 118 348.
Depósito legal: 122 152/98.

© Zinet Media Global, S.L. Esta publicação é propriedade exclusiva da Zinet Media Global, S.L., e a sua reprodução total ou parcial, não autorizada, é totalmente proibida, de acordo com os termos da legislação em vigor. Os contraventores serão perseguidos legalmente, tanto a nível nacional como internacional. O uso, cópia, reprodução ou venda desta revista só poderá realizar–se com autorização expressa e por escrito da Zinet Media Global, S.L.

«AS MAIS DE 100 MIL MILHÕES DE GALÁXIAS, SALPICADAS PELO ESPAÇO COMO DIAMANTES CELESTES, NÃO SÃO SENÃO MECÂNICA QUÂNTICA ESCRITA EM LETRAS GARRAFAIS NO CÉU»

Brian Greene (1963)
Físico teórico, matemático e teórico das cordas

11,99 €
(Cont.)
00067
8 414237 002706

SUPER INTERESSANTE